

Эволюция научной мысли от Ньютона до Эйнштейна

А. Д'Абро

THE EVOLUTION OF
SCIENTIFIC THOUGHT FROM
NEWTON TO EINSTEIN

By

A. D'ABRO



NEW YORK
BONI & LIVERIGHT
1927

Содержание

[ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ ОТ НЬЮТОНА ДО ЭЙНШТЕЙНА](#)

[ПРЕДИСЛОВИЕ](#)

[СОДЕРЖАНИЕ](#)

[ПРЕДИСЛОВИЕ](#)

[ЧАСТЬ I ФИЗИКА ДО РЕЛИГИИ](#)

[ГЛАВА I МНОЖЕСТВЕННОСТИ](#)

[ГЛАВА II РОЖДЕНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ](#)

[ГЛАВА III ОТКРЫТИЯ РИМАННА И КОНГРУЕНЦИЯ](#)

[ГЛАВА IV ПРОБЛЕМА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА](#)

[ГЛАВА V АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА НЕЕВКЛИДОВЫ ГЕОМЕТРИИ](#)

[ГЛАВА VI ВРЕМЯ](#)

[ГЛАВА VII СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И РАССТОЯНИЕ](#)

[ГЛАВА VIII ЗНАЧЕНИЕ СЛОВА «ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ»](#)

[ГЛАВА IX ПРИНЦИПЫ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА X КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И НЬЮТОНОВСКИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XI ЭФИР](#)

[ГЛАВА XII УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПО И ТЕОРИЯ ЛОРЕНЦА](#)

[ЧАСТЬ II СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XIII СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА](#)

[ГЛАВА XIV РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА](#)

[ГЛАВА XV ПОСЛЕДСТВИЯ НОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ —
СОВРЕМЕННОСТЬ](#)

[ГЛАВА XVI ПРАКТИЧЕСКОЕ СООТВЕТСТВИЕ В РЕЛЯТИВНОСТИ](#)

[ГЛАВА XVII МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРЕДПОЛОЖЕНИЙ ЭЙНШТЕЙНА](#)

[ГЛАВА XVIII ОТКРЫТИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ](#)

[ГЛАВА XIX РАЗЛИЧНЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ МИРЫ](#)

[ГЛАВА XX НЕВЕРСИБИЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ](#)

[ГЛАВА XXI РЕАЛЬНОСТЬ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИН И УДЛИНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XXII И ПУТЕШЕСТВИЕ К ЗВЕЗДЕ](#)

[ЧАСТЬ III ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XXIII ПОТЕНЦИАЛЫ И СИЛЫ](#)

[ГЛАВА XXIV ПОСТУЛАТ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ](#)

[ГЛАВА XXV ВКЛЮЧЕНИЕ ГРАВИТАЦИИ В МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ](#)

[ГЛАВА XXVI ТЕНЗОРЫ И ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ](#)

[ГЛАВА XXVII ПРИНЦИП ОБЩЕЙ КОВАРИАНТНОСТИ ИЛИ ОБЩИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XXVIII ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА ГРАВИТАЦИИ ЭЙНШТЕЙНА](#)

[ГЛАВА XXIX ОБЩИЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ](#)

[ГЛАВА XXX ПРОВЕРКА ЗАКОНА ЭЙНШТЕЙНА](#)

[ГЛАВА XXXI РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ НА ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ](#)

[ГЛАВА XXXII ПРИНЦИПЫ СОХРАНЕНИЯ](#)

[ГЛАВА XXXIII ДРУГИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ](#)

[ГЛАВА XXXIV КОНЕЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ](#)

[ГЛАВА XXXV ВАЖНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ](#)

[ГЛАВА XXXVI ТАЙНА МАТЕРИИ](#)

[ГЛАВА XXXVII ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ И ЭДДИНГТОНА](#)

[ЧАСТЬ IV МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ](#)

[ГЛАВА XXXVIII МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ](#)

[ГЛАВА XXXIX КООРДИНАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМАЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ГЛАВА XL ОБЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ](#)

[ПРИЛОЖЕНИЯ](#)

[ПРИЛОЖЕНИЕ I ГРАФИКИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ](#)

[ПРИЛОЖЕНИЕ II ИЗОГНУТОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ](#)

[ПРИЛОЖЕНИЕ III ГРАВИТАЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ](#)

[ПРИЛОЖЕНИЕ IV ПРОСТРАНСТВО, ГРАВИТАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ](#)

[СНОСКИ:](#)

[ПОЛНАЯ ЛИЦЕНЗИЯ ПРОЕКТА ГУТЕНБЕРГ](#)

Электронная книга проекта Гутенберга «Эволюция научной мысли от Ньютона до Эйнштейна»

Эта электронная книга предназначена для бесплатного использования в любой точке США и большинства других стран мира практически без каких-либо ограничений. Вы можете копировать, передавать или повторно использовать ее в соответствии с условиями лицензии проекта «Гутенберг», включенной в эту электронную книгу или доступной онлайн по [адресу www.gutenberg.org](http://www.gutenberg.org). Если вы не проживаете в США, перед использованием этой электронной книги вам необходимо ознакомиться с законодательством страны, в которой вы проживаете.

Название: Эволюция научной мысли от Ньютона до Эйнштейна

Автор: А. Д'Абро

Дата выпуска: 6 сентября 2024 г. [электронная книга № 74381]

Язык: английский

Оригинальное издание: Нью-Йорк: Boni & Liveright, 1927

Благодарности: Лаура Натал Родригес (Изображения любезно предоставлены The Internet Archive.)

*** НАЧАЛО ПРОЕКТА GUTENBERG EBOOK ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ ОТ НЬЮТОНА ДО ЭЙНШТЕЙНА ***

ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ ОТ НЬЮТОНА ДО ЭЙНШТЕЙНА

ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ ОТ НЬЮТОНА ДО ЭЙНШТЕЙНА

АВТОР: А. Д'АБРО

НЬЮ-ЙОРК
БОНИ И ЛИВЕРАЙТ
1927

АВТОРСКОЕ ПРАВО 1927 :: BONI & LIVERIGHT, INC.

ПЕЧАТАНО В СОЕДИНЕННЫХ ШТАТАХ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Хотя за последние три столетия научные теории подвергались всевозможным изменениям и превращениям, движущая сила, вдохновлявшая ученых, оставалась неизменной — поиск единства в разнообразии, стремление привести гармонию и порядок в то, что на первый взгляд может показаться безнадежным хаосом экспериментальных фактов.

В этой книге рассматриваются основные черты великих открытий Ньютона, кажущаяся неизбежность абсолютного пространства и времени в классической науке. Затем мы переходим к Риману, великому математику, который вырвал проблему пространства из догматического сна, в котором она так долго пребывала. Наконец, мы видим, как Эйнштейну удалось перенести в область физики идеи, выдвинутые Риманом, дав нам тем самым величайшее достижение современной мысли — теорию относительности.

Хотя я использовал нетехнический язык, большое внимание было уделено точному изложению фактов. Однако в некоторых частях, особенно в тех, которые посвящены неевклидовой геометрии и принципу действия, некоторое упрощение изложения оказалось неизбежным из-за крайней техничности обсуждаемых тем. Но поскольку речь шла о том, чтобы либо изложить эти темы в упрощенном виде, либо полностью исключить их из книги, было решено, что лучше пожертвовать точностью ради общей полноты изложения.

Здесь, однако, читателю следует напомнить, что даже для тех, кто интересуется исключительно тенденциями мысли или эволюцией идей, ни одна популярная или полупопулярная книга не может заменить высокотехнические математические труды. Превосходство последних заключается не в самих математических формулах, которые они содержат. Оно заключается скорее в способности математического инструмента дать нам более глубокое понимание проблем природы, раскрыть неожиданные гармонии и расширить наш обзор на области мысли, из которых в противном случае был бы исключен человеческий разум. Таким образом, единственная роль, которую может выполнять полупопулярная книга, — это служить общим введением, пробуждать аппетит к дальнейшим знаниям, если в нас есть жажда знаний. Предположение, как это делают философы, что смутное понимание высокотехнического предмета, почерпнутое из полупопулярных сочинений или из отдельных фраз, вырванных из технической книги, должно позволить им излагать теорию, критиковать ее и, что еще хуже, украшать ее своими собственными идеями, — это мнение, которое во многом способствовало созданию атмосферы недоверия к их сочинениям. Ответ, который Евклид дал царю Птолемею: «Нет королевской дороги, нет короткого пути к знанию», остается верным и сегодня, и даже более верным, чем в дни древней Александрии, когда наука еще не выросла до размеров могучего дерева.

Я хотел бы воспользоваться этой возможностью, чтобы выразить свою благодарность профессору Ли Пейджу из Йельского университета за его любезность в просмотре рукописи и предоставлении многих ценных предложений.

А. Д'Абро.

НЬЮ-ЙОРК, 1927.

СОДЕРЖАНИЕ

	СТРАНИЦА
ПРЕДИСЛОВИЕ	ix
ЧАСТЬ I	
ФИЗИКА ДО РЕЛЯТИВНОСТИ	
ГЛАВА	
I. МНОЖЕСТВА	23
II. РОЖДЕНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ	32
III. ОТКРЫТИЯ РИМАННА И КОНГРУЕНЦИЯ	39
IV. ПРОБЛЕМА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА	47
V. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА НЕЕВКЛИДОВУ ГЕОМЕТРИИ	60
VI. ВРЕМЯ	71
VII. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И РАССТОЯНИЙ	83
VIII. ЗНАЧЕНИЕ СЛОВА «ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ»	99
IX. ПРИНЦИПЫ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	103
X. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И НЬЮТОНОВСКИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	106
XI. ЭФИР	116
XII. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПО И ТЕОРИЯ ЛОРЕНЦА	125
ЧАСТЬ II	
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	

XIII. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА	<u>143</u>
XIV. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА	<u>156</u>
XV. ПОСЛЕДСТВИЯ НОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ — СОВРЕМЕННОСТЬ	<u>161</u>
XVI. ПРАКТИЧЕСКОЕ СООТВЕТСТВИЕ В РЕЛЯТИВНОСТИ	<u>187</u>
XVII. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРЕДПОЛОЖЕНИЙ ЭЙНШТЕЙНА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРЕДПОСЫЛОК ЭЙНШТЕЙНА	<u>193</u>
XVIII. ОТКРЫТИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ	<u>195</u>
XIX. РАЗЛИЧНЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ МИРЫ	<u>201</u>
XX. НЕОБРАТИМОСТЬ ВРЕМЕНИ	<u>212</u>
XXI. РЕАЛЬНОСТЬ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИН И УДЛИНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ	<u>219</u>
XXII. ПАРАДОКСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЕНИ И ПУТЕШЕСТВИЕМ К ЗВЕЗДЕ	225
ЧАСТЬ III	
ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	
XXIII. ПОТЕНЦИАЛЫ И СИЛЫ	<u>245</u>
XXIV. ПОСТУЛАТ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ	<u>250</u>
XXV. ВКЛЮЧЕНИЕ ГРАВИТАЦИИ В МОДЕЛЬ КАЖДОГО ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ	<u>261</u>
XXVI. ТЕНЗОРЫ И ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ	<u>266</u>
XXVII. ПРИНЦИП ОБЩЕЙ КОВАРИАНТНОСТИ, ИЛИ ОБЩИЙ ПРИНЦИП ОТНОШЕНИЯ	<u>276</u>
XXVIII. ОТКРЫТИЕ ЭЙНШТЕЙНОВСКОГО	<u>281</u>

ЗАКОНА ГРАВИТАЦИИ

XXIX. ОБЩИЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ	286
XXX. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ЭЙНШТЕЙНА	290
XXXI. РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ НА ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ	293
XXXII. ПРИНЦИПЫ СОХРАНЕНИЯ	305
XXXIII. ДРУГИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ УРАВНЕНИЯ	310
XXXIV. КОНЕЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ	313
XXXV. ВАЖНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ	347
XXXVI. ТАЙНА МАТЕРИИ	356
XXXVII. ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ И ЭДДИНГТОНА	360

ЧАСТЬ IV

МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ

XXXVIII. МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ	373
XXXIX. КООРДИНАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	474
XL. ОБЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕОРИИ ОТНОШЕНИЯ	481

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ГРАФИКИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ	509
II. ИЗОГНУТОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ	524
III. ГРАВИТАЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ	527
IV. ПРОСТРАНСТВО, ГРАВИТАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ	531

ПРЕДИСЛОВИЕ

«И вот, в наше время разразился катаклизм, который смел пространство, время и материю, до сих пор считавшиеся самыми прочными столпами естественных наук, но только для того, чтобы освободить место для более широкого взгляда на вещи и более глубокого их понимания».

Х. ВЕЙЛ («Пространство, время и материя»).

Теория относительности представляет собой величайший прорыв в нашем понимании природы, который когда-либо наблюдался в философии.

Если наш интерес носит чисто философский характер, мы, возможно, захотим кратко ознакомиться с сутью выводов Эйнштейна, чтобы проанализировать их влияние на преобладающие философские идеи нашего времени. К сожалению, такой упрощенный подход практически неосуществим. Сами выводы содержат высокотехнические понятия, и если их объяснять неточно и ненаучно, то это может создать совершенно неверное впечатление. Но даже если предположить, что эту первую трудность можно преодолеть, мы обнаружим, что выводы Эйнштейна носят настолько революционный характер, что требуют отказа от наших представлений о пространстве, времени и материи, что их принятие может оказаться слишком большим испытанием для нашей доверчивости. Либо мы полностью отвергнем эту теорию как гигантскую мистификацию, либо будем вынуждены принять ее на веру, и в этом случае воспринимать ее очень смутно и неясно.

Изучив многочисленные книги, написанные на эту тему рядом современных философов, автор твердо убежден, что единственный способ подойти к этой теории, даже если наш интерес носит чисто философский характер, — это изучить научную проблему с самого начала. И под началом мы имеем в виду не первую статью Эйнштейна, опубликованную в 1905 году; мы должны вернуться гораздо дальше, во времена Максвелла и даже Ньютона. Здесь можно упомянуть, что, каким бы революционным ни казалась теория относительности в своих философских последствиях, она является прямым продуктом научного метода, проводимого в том же духе, что и вдохновлял Ньютона и Максвелла; никакой новой метафизики здесь нет. Действительно, теория Эйнштейна представляет собой лишь усовершенствование классической науки; она никогда не могла бы возникнуть без того огромного накопления математических и физических знаний, которое было собрано, в особенности, со времен Галилео. В этих условиях совершенно невозможно получить правильное представление о открытиях теории относительности, если сначала не ознакомиться с открытиями классической науки, предшествовавшими эпохе Эйнштейна. Поэтому цель этой книги, прежде чем обсуждать саму теорию Эйнштейна, состоит в том, чтобы как можно проще изложить эту необходимую предварительную информацию.

Современная наука, за исключением геометрии, является сравнительно недавним творением и, можно сказать, берет свое начало от Галилео и Ньютона. Галилео был первым ученым, который ясно осознал, что единственный способ углубить наше понимание физического мира — это прибегнуть к эксперименту. Как бы очевидным ни казалось утверждение Галилея в свете наших современных знаний, остается фактом, что греки, несмотря на свое мастерство в геометрии, по-видимому, никогда не осознавали важность экспериментов (за исключением Демокрита и Архимеда).

В некоторой степени это можно объяснить примитивностью их измерительных инструментов. Однако такое оправдание вряд ли может быть принято во внимание, если вспомнить об элементарном характере экспериментов и наблюдений Галилео. Наблюдение за колебаниями лампы в соборе Милана (), бросание тел с Пизанской башни, скатывание шаров по наклонным плоскостям, замечание увеличивающего эффекта воды в сферической стеклянной вазе — таковы были эксперименты и наблюдения Галилея. Как видно, их вполне могли бы провести и греки. В любом случае, именно благодаря таким экспериментам Галилей открыл фундаментальный закон динамики, согласно которому ускорение, придаваемое телу, пропорционально действующей на него силе.

Следующий прорыв был сделан Ньютоном, величайшим ученым всех времен, если учитывать его совместный вклад в математику и физику. Как физик, он, конечно, был горячим приверженцем эмпирического метода, но его величайшая слава связана с другим направлением. До Ньютона математика, главным образом в форме геометрии, изучалась как изящное искусство без какого-либо отношения к ее физическим применениям, за исключением очень тривиальных случаев.^[1] Но с Ньютоном все ресурсы математики были обращены на решение физических проблем. С тех пор математика стала инструментом открытий, самым мощным из известных человеку, умножающим силу мысли, так же как в механике рычаг умножает нашу физическую силу. Именно это применение математики к решению физических задач, это сочетание двух отдельных областей исследования, составляет существенную характеристику метода Ньютона. Таким образом, задачи физики превратились в задачи математики.

Но в дни Ньютона математический инструмент все еще находился в очень отсталом состоянии развития. И в этой области Ньютон снова проявил свой гений, изобретая интегральное исчисление. В результате этого замечательного открытия проблемы, которые поставили бы в тупик Архимеда, были решены с легкостью. Мы знаем, что в руках Ньютона этот новый подход к научному методу привел к открытию закона всемирного тяготения. Но и здесь реальное значение достижения Ньютона заключалось не столько в точной количественной формулировке закона притяжения, сколько в том, что он установил наличие закона и порядка по крайней мере в одной важной области природы, а именно в движении небесных тел. Таким образом, природа продемонстрировала рациональность и оказалась не просто слепым хаосом и неопределенностью. Конечно, исследования Ньютона касались лишь небольшой группы природных явлений (движения планет и падающих тел), но казалось маловероятным, что этот математический закон и порядок окажутся ограниченными определенными особыми явлениями; и было общее ощущение, что все физические процессы природы будут разворачиваться в соответствии с строгими математическими законами.

Невозможно переоценить важность открытий Ньютона и их влияние на мыслителей XVIII века. Снова раздалось гордое заявление Архимеда: «Дайте мне рычаг и точку опоры, и я подниму Землю». Но заявление последователей Ньютона было гораздо громче: «Дайте нам знание законов природы, и будущее и прошлое откроют свои секреты».

Сегодня эти надежды кажутся несколько наивными, но это потому, что мы узнали о природе гораздо больше, чем могли себе представить современники Ньютона. Тем не менее, хотя мы и осознали, что никогда не сможем стать полубогами, математический инструмент в сочетании с экспериментальным методом по-прежнему остается нашим самым плодотворным средством прогресса.

Применяя математику к проблемам физики, Ньютон занимался только самыми простыми физическими проблемами — движением планет, механикой, распространением

звука и т. д. Но когда дело дошло до применения математического метода к более сложным физическим проблемам, потребовалось значительное продвижение в наших научных знаниях, как математических, так и эмпирических. Благодаря постепенному накоплению физических данных и усилиям великих последователей Ньютона в области чистой математики (Эйлер, Лагранж, Лаплас), в первой половине XIX века созрели условия для систематического математического исследования многих тайн природы.

Созданные математические теории были известны под общим названием *теорий математической физики*. Поскольку они представляли собой простое применение математики к природным явлениям, их прототипом была небесная механика Ньютона. Единственное отличие заключалось в том, что они касались широкого спектра физических явлений (электрических, гидростатических и т. д.), а не только явлений чисто механической природы. Наиболее известные из этих теорий (такие как теории Максвелла, Больцмана, Лоренца и Планка) касались очень специальных классов явлений. Но с появлением теории относительности Эйнштейна, которая сама по себе является развитием математической физики, сфера наших исследований настолько расширилась, что мы значительно приблизились к идеалу единой математической теории, охватывающей все физические знания. Этот факт сам по себе показывает нам огромный философский интерес теории относительности.

Во всех этих теориях математической физики неизменно используется один и тот же тип процедуры. Экспериментаторы устанавливают определенные факты и обнаруживают точные числовые соотношения между величинами, например, между интенсивностью электрического тока, протекающего по проводу, и интенсивностью и ориентацией магнитного поля, окружающего провод. Затем на сцену выходит математический физик, который присваивает определенным физическим величинам (в данном случае электрическому току, обозначенному i , и магнитной интенсивности, обозначенной H) определенные буквы алфавита и таким образом переводит числовые соотношения, обнаруженные экспериментатором, в математическую форму. Таким образом, он получает математическое соотношение или уравнение α , которое, как предполагается, представляет собой математическое отображение конкретного физического явления A . Теперь его задача будет заключаться в том, чтобы извлечь из своего математического уравнения или уравнений α все необходимые математические следствия. Таким образом, при условии, что его техника не подведет его, он может прийти к новым уравнениям β . Эти новые уравнения β , когда они будут переведены обратно из математической формы в физическую, будут выражать новые физические соотношения B .

Математик предполагает, что так же, как его уравнения β были необходимыми математическими следствиями его исходных уравнений α , так и физический перевод β должен составлять физическое явление B , которое следует как необходимое следствие существования физического явления A . Если A происходит, то B должно последовать.

Таким образом, мы понимаем значение теории математической физики. Ее полезность заключается в том, что она позволяет нам предвидеть и предсказать физические явления. Таким образом, она предлагает точные эксперименты, о которых, возможно, никто бы и не подумал, и позволяет нам предвидеть новые взаимосвязи и новые законы, а также открывать новые факты. С философской точки зрения, устанавливая рациональную связь между явлениями, которые кажутся несвязанными, она позволяет нам обнаружить гармонию и единство природы, которые скрываются под внешней видимостью хаоса.

Конечно, экспериментатор в первую очередь должен быть очень осторожен, чтобы предоставить математику точную информацию; ведь если по какой-то причине его

информация будет лишь приблизительно верной, математический перевод также будет неточным, и математические последствия а могут еще больше расходиться с миром физической реальности. Это похоже на то, как если бы, стреляя по удаленной цели, мы направили винтовку чуть-чуть в сторону; чем больше расстояние, тем больше будет расхождение. Опасности такого рода, конечно, неизбежны, поскольку человеческие наблюдения неизбежно несовершенны. Поэтому в любом случае физические прогнозы математика всегда потребуют тщательной проверки последующими экспериментами. Однако, очевидно, что на карту поставлено нечто гораздо более важное, чем просто точность наблюдений.

Математические выводы рождаются в уме; они относятся к разуму и не зависят от опыта. Поэтому, когда мы предполагаем, что наши математические выводы и операции будут успешно отражать работу природы, мы предполагаем, что природа также рациональна и что, следовательно, между двумя мирами, математическим и физическим, существует определенный параллелизм или соответствие. *Априори*, кажется, нет никакой логической необходимости в существовании такого параллелизма. Здесь, однако, мы сталкиваемся с ситуацией, над которой бесполезно философствовать. Успех сопровождал усилия математических физиков в таком большом количестве случаев, что, как бы удивительно это ни казалось, мы едва ли можем избежать вывода, что природа должна быть рациональной и подчиняться математическим законам. Фактически, если бы это было не так, предвидение было бы невозможно, а наука не существовала бы.

Возможно, природа лишь приблизительно рациональна; возможно, ее рациональность обусловлена очень грубыми методами наших наблюдений, и более точные эксперименты дали бы совсем иную картину. Эддингтон заходит так далеко, что предполагает, что трудности, с которыми мы сталкиваемся при изучении квантовых явлений, могут действительно быть связаны с тем, что природа оказывается иррациональной, когда мы пытаемся исследовать ее процессы микроскопическим способом. Это возможность, которую мы не можем себе позволить отвергнуть. Но в любом случае, пока наши теории подтверждаются экспериментами, мы должны действовать так, как будто природа рациональна, и надеяться на лучшее.

Не следует думать, что введение математического инструмента в наше изучение природы создает какое-то существенное отклонение от обычного метода дедуктивного и индуктивного мышления. В математическом анализе нет ничего особо загадочного; его единственная отличительная черта заключается в том, что он более надежен, более точен и позволяет нам продвигаться дальше и по более безопасным путям.

Рассмотрим, например, хорошо известное изменение цвета с красного на белый, которое проявляется в свете, излучаемом через отверстие в нагретом корпусе по мере повышения температуры. Из этого элементарного факта наблюдения Планк, благодаря математическому анализу, смог сделать вывод о существовании квантов света и, следовательно, о возможности того, что все процессы изменения являются дискретными и что тело может вращаться только с определенными скоростями. Очевидно, что обычное мышление без помощи математики никогда бы не привело нас даже к подозрению о таких необычных результатах.

Когда мы говорим, что теория математической физики верна, мы имеем в виду только то, что различные математические следствия, которые мы можем извлечь из ее уравнений, требуют существования физических явлений, которые удалось подтвердить экспериментально. С другой стороны, если наши математические прогнозы не совпадают с экспериментальными проверками, мы должны признать, что наша теория неверна. Это не

означает, что она неверна с чисто математической точки зрения, поскольку в любом случае она иллюстрирует возможный рациональный мир; но она неверна в том смысле, что не иллюстрирует наш реальный мир. Тогда мы должны предположить, что наши исходные уравнения, по всей вероятности, были неверным переводом физических явлений, которые они должны были представлять.

Однако в ряде случаев было признано ненужным отказываться от теории только потому, что одно из ее предсказаний было опровергнуто экспериментом. Вместо этого часто можно предположить, что расхождение между математическим предсказанием и физическим результатом может быть вызвано каким-то случайным физическим воздействием, которое из-за неполноты физических данных, предоставленных нам экспериментаторами, не было учтено в наших уравнениях. Показательным примером является открытие Нептуна.

Математическая обработка движения планет по Ньютону присвоила планете Уран определенное движение (). Астрономические наблюдения затем доказали, что фактическое движение Урана () не совпадало с этими математическими прогнозами. Тем не менее, не было сочтено необходимым отказываться от закона Ньютона; Адамс и Леверрье предположили, что отклонения в движении Урана могут быть вызваны неизвестной планетой, лежащей за орбитой Урана. Учитывая существование этой неизвестной планеты в своих математических вычислениях, Леверрье удалось определить точное положение, которое она должна была занимать на небе в заданную дату. Как хорошо известно, в точно рассчитанном месте с помощью мощного телескопа была обнаружена неуловимая планета (в настоящее время названная Нептуном).

Такой подход, когда расхождения в наших математических прогнозах объясняются наличием случайных факторов, а не неверностью нашей теории, является вполне человеческим. Не стоит отказываться от теории, которая привела к точным прогнозам в 99 случаях из 100, только потому, что сотый случай оказался исключением. Но мы должны понимать, что этот подход, заключающийся в обращении к внешним влияниям, хотя и вполне оправданный в качестве предварительного, должен применяться с определенной осторожностью; в каждом конкретном случае он должен быть оправдан *апостериорным* определением факта. Таким образом, Леверрье был также первым, кто обнаружил определенные нерегулярности в движении планеты Меркурий. Как и в случае с Ураном, он попытался объяснить эти расхождения наличием внутренней планеты, которую он назвал Вулканом и которая, по его предположению, двигалась между орбитой Меркурия и Солнцем. Однако астрономы не смогли найти ни малейших следов Вулкана, и вера в его существование была отвергнута. Если для объяснения аномалий Меркурия необходимо прибегнуть к случайным влияниям, мы должны искать их в каком-то другом направлении.

В данном конкретном случае все другие предположения были одинаково неудовлетворительными. Поэтому еще до появления теории Эйнштейна были высказаны сомнения в точности закона всемирного тяготения Ньютона. Метод исправления ошибочных теоретических прогнозов с помощью гипотез *ad hoc* не заслуживает особого одобрения. Однако когда, как в случае с Вулканом и Нептуном, влияние, к которому мы прибегаем, относится к категории, поддающейся непосредственному наблюдению, этот метод является законным. Но когда наша гипотеза *ad hoc* по своей природе выходит за пределы наблюдения, и когда, в дополнение к этому, ее полезность носит чисто локальный характер, объясняя один конкретный факт и никакой другой, она становится хуже, чем бесполезной.

Это отвращение науки к непроверяемым гипотезам *ad hoc*, которые так часто встречаются в спекуляциях метафизиков, не обусловлено просто феноменистическим

желанием исключить все, что нельзя увидеть или ощутить. Оно проистекает из более глубокой причины, связанной со всей *сущностью* научной теории. Допустим, например, что наша теория привела нас к предсказанию определенного результата, а эксперимент или наблюдение доказали, что в действительности был получен другой результат. Мы всегда могли бы исправить ситуацию, произвольно постулировав какое-то локальное невидимое и непроверяемое влияние, которое мы могли бы приписать наличию таинственной эфирной среды — скажем, эфира *A*. Таким образом, мы добавили бы новое влияние в нашу схему природы.

Если бы мы теперь приняли во внимание это новое влияние, первый численный результат, конечно, был бы объяснен автоматически, поскольку наш эфирный *A* был разработан с этой конкретной целью. Но теперь мы должны были бы ожидать другого численного результата для какого-то другого явления. Если бы это второе ожидание было опровергнуто экспериментом, мы могли бы прибегнуть к какому-то второму непроверяемому возмущающему влиянию, чтобы объяснить несоответствие, оставив первый результат неизменным. Назовем это новое влияние эфирным *B*. Мы могли бы продолжать таким образом бесконечно.

Но очевидно, что наша теория математической физики, целью которой было позволить нам предвидеть и предсказать, теперь стала бы бесполезной. Никаких новых явлений предсказать было бы невозможно, поскольку прошлый опыт показал бы нам, что для подтверждения теории экспериментом необходимо постоянно привлекать непредвиденные влияния. В этих условиях мы могли бы с таким же успехом отказаться от всех попыток построить математическую модель Вселенной.

Предположим теперь, что, изменив раз и навсегда наши исходные посылки, мы приходим к теории, которая позволяет нам предвидеть и предсказывать численные результаты, которые неизменно подтверждаются экспериментом с максимальной точностью, без необходимости прибегать к помощи ряда посторонних гипотез. В этом случае мы можем предположить, что новая теория верна, поскольку она плодотворна, а наша прежняя теория была неверна, поскольку она никуда нас не привела.

Изложенные нами соображения имеют важное значение для понимания внешнего мира, которое разделяет подавляющее большинство ученых. Если мы считаем, что самая простая из всех математических теорий, которая согласуется с экспериментом, является правильной теорией, дающей нам правильное представление о реальном мире, то мы должны признать, что было бы опасно обременять себя рядом гипотетических предположений на слишком ранней стадии наших исследований.

Конечно, нам, возможно, придется сделать ряд фундаментальных допущений, но мы должны рассматривать их лишь как рабочие гипотезы, от которых, возможно, придется отказаться на более позднем этапе, если они приведут к слишком сложному синтезу фактов эксперимента. Мы увидим, например, что теория относительности заставляет нас отказаться от нашего традиционного понимания пространства и времени. Именно этот факт, более чем любой другой, стал причиной прохладного приема, оказанного этой теорией многими мыслителями. Однако когда мы убеждаемся, что синтез Эйнштейна является самым простым из всех возможных, если должным образом учесть результаты сверхточных экспериментов, и когда мы понимаем, что синтез, основанный на классическом понимании отдельного пространства и времени, был бы возможен только при условии, что мы были бы готовы ввести множество совершенно несвязанных гипотез *ad hoc*, которые не давали бы возможности прямой проверки, мы не можем легко оспорить обоснованность выводов Эйнштейна.

Однако есть те, кто утверждает, что у нас есть *априорное* интуитивное понимание пространства и времени, которое является фундаментальным, и , что мы должны пожертвовать простотой математической координации, если она вступает в противоречие с этими фундаментальными интуитивными представлениями. Разумеется, ни один ученый не может согласиться с такими взглядами. Совершенно независимо от открытий Эйнштейна, математики много лет назад опровергли эти кантовские представления о пространстве и времени. Как очень метко замечает Эйнштейн в своих лекциях в Принстоне:

«Единственное оправдание наших концепций и системы концепций заключается в том, что они служат для представления комплекса наших опытов; за пределами этого они не имеют никакой легитимности. Я убежден, что философы оказали вредное влияние на прогресс научного мышления, вынеся некоторые фундаментальные концепции из области эмпиризма, где они находятся под нашим контролем, в неосязаемые высоты *априорного*. Даже если окажется, что вселенная идей не может быть выведена из опыта логическими средствами, но в некотором смысле является творением человеческого разума, без которого наука невозможна, тем не менее эта вселенная идей так же мало зависит от природы нашего опыта, как одежда от формы человеческого тела. Это особенно верно в отношении наших концепций времени и пространства, которые физики были вынуждены спустить с Олимпа *априорного*, чтобы скорректировать их и привести в пригодный для использования вид».

В только что процитированном отрывке Эйнштейн рассуждает с точки зрения физика, но высказанные им мнения, безусловно, поддержат и чистые математики. Именно они, более чем кто-либо другой, пришли к пониманию того, насколько осторожно мы должны относиться к велениям интуиции и так называемого здравого смысла. Они знают, что тот факт, что мы можем представить или вообразить определенную вещь только определенным образом, не является критерием правильности нашего суждения. Примеров в математике предостаточно. Например, до открытий Вейерштрасса, Римана и Дарбу идея о том, что непрерывная кривая может не иметь определенного наклона в каждой точке, считалась абсурдной; однако сегодня мы знаем, что подавляющее большинство кривых относятся к этому типу. Точно так же наша интуиция подсказывает нам, что линия, будь то кривая или прямая, не имеющая ширины, совершенно неспособна полностью покрыть площадь; однако, как показали Пеано и другие, наша интуиция вновь вводит нас в заблуждение. Можно привести много других примеров, но они носят слишком технический характер и не заслуживают нашего внимания. В любом случае, математики в целом отказались подвергать сомнению обоснованность теории Эйнштейна только на том основании, что она противоречила нашим традиционным интуитивным представлениям о пространстве и времени, и нам не следует удивляться тому, что Пуанкаре, один из величайших математиков XIX века, оказал полную поддержку Эйнштейну, когда теория подвергалась жестоким нападкам в первые дни своего появления.

Теперь мы должны очень кратко рассмотреть некоторые философские проблемы, которые предшествовали открытиям Эйнштейна, но с которыми его теория тесно связана. Задолго до появления Эйнштейна проблемы, связанные с относительностью движения в пустом пространстве, занимали внимание исследователей природы. Некоторые считали, что пустое пространство, а вместе с ним и все движение, должны быть относительными (), что состояния абсолютного движения или абсолютного покоя в пустом пространстве являются бессмысленными понятиями. По мнению этих мыслителей, чтобы придать значение движению и покою, необходимо было соотносить последовательные положения тела с каким-либо другим произвольно выбранным телом, взятым в качестве системы отсчета. Таким образом, мы должны были бы получить относительный покой или движение материи по отношению к материи. Все эти взгляды полностью согласовывались с нашими

визуальными восприятиями и были выражены в так называемом **визуальном или кинематическом принципе относительности движения**. Другие мыслители предпочитали придерживаться противоположной философии. Они предполагали, что пространство является абсолютным; что все движение должно быть абсолютным; что утверждение о том, что тело находится в движении или в покое в пространстве, имеет смысл, независимо от наличия других тел, которые можно использовать в качестве терминов для сравнения. Споры могли бы продолжаться бесконечно, если бы не появление ученого с его эмпирическими методами исследования.

Галилей и Ньютон были первыми, кто ясно осознал, что при определенных очень правдоподобных допущениях динамические доказательства, полученные в результате механических экспериментов, свидетельствовали о несостоятельности релятивистской философии. Классическая наука была поэтому вынуждена признать абсолютность пространства и движения. Правда, многие философы по-прежнему отстаивали относительность всех видов движения. Но их неспособность принять во внимание реальные препятствия, которые, казалось, преграждали путь к релятивистской концепции движения, в сочетании с нестрогостью их научных аргументов, не позволила их мнениям оказать какое-либо влияние на научную мысль. Следует отметить, что, несмотря на абсолютную природу, которую Ньютон приписывал всем состояниям движения и покоя в пустом пространстве, он признавал, что определенный тип абсолютного движения, называемый галилеевым ^[2] или равномерным поступательным движением (определяемым абсолютной скоростью, но без абсолютного ускорения), невозможно обнаружить с помощью механических экспериментов. Эта полная нерелевантность абсолютной скорости или абсолютного галилеева движения для механических экспериментов была выражена в так называемом галилеевом или ньютоновском, или классическом, или динамическом принципе относительности галилеева движения в пустом пространстве. Существование такого принципа относительности создало двойственность в физическом значении движения, а значит, и пространства, но философская значимость этого принципа, относящегося к проблеме пространства, была уменьшена тем фактом, что эта относительность применялась исключительно к экспериментам механического характера. С уверенностью предполагалось, что электромагнитные и оптические эксперименты позволят обнаружить абсолютные галилеевы движения, которые ускользали от механических испытаний.

Таково было положение дел, когда в 1905 году Эйнштейн опубликовал свою знаменитую статью об электродинамике движущихся тел. В ней он отметил, что многочисленные трудности, связанные с уравнениями электродинамики, а также отрицательные результаты экспериментов по измерению скорости света, проведенных Майкельсоном и другими, будут устранены, если мы расширим действие ньютоновского принципа относительности галилеева движения (который применялся исключительно к механическим явлениям) таким образом, чтобы он включал все виды явлений: электродинамические, оптические и т. д.

При таком расширении ньютоновский принцип относительности стал **специальным принципом относительности Эйнштейна**. Его значение заключалось в утверждении, что абсолютное галилеево движение или абсолютная скорость всегда должны ускользать от любого экспериментального обнаружения. Отныне абсолютная скорость должна была рассматриваться как физически бессмысленная не только в конкретной области механики, как в дни Ньютона, но и во всей области физических явлений. Специальный принцип Эйнштейна, усиливая акцент на этой относительности скорости и делая абсолютную скорость метафизически бессмысленной, создал еще более глубокое различие между

скоростью и ускоренным или вращательным движением. Последний тип движения остался абсолютным и реальным, как и прежде. Из этого мы видим, что специальный принцип был далек от оправдания ультрарелятивистской веры в полную относительность всех движений, воплощенной в кинематическом или визуальном принципе относительности.

Очень важно понять этот момент и осознать, что специальный принцип Эйнштейна является лишь расширением действия классического ньютоновского принципа на все классы явлений. Помимо этого расширения, между двумя принципами нет существенной разницы, поскольку оба они касаются исключительно галилеева движения или скорости. Большая часть критики, направленной против специальной теории Эйнштейна, и в частности против ее так называемых парадоксов, может быть объяснена путаницей со стороны критиков между очень широким визуальным или кинематическим принципом относительности всех видов движения, включая ускорение, а также скорость, и гораздо более ограниченным специальным принципом, который касается исключительно скорости.

Из-за этой первоначальной ошибки некоторые полагают, что теория относительности утверждает полную относительность всех видов движения. Что касается специальной теории, то это предположение явно несостоятельно; и, как и в классической науке, сохраняется очень четкое различие между значением ускорения и скорости. Это различие отнюдь не ново, поскольку оно является неотъемлемой частью классической науки; но, учитывая его важность для любого, кто желает получить представление о философских последствиях более сложной теории Эйнштейна, мы сочли целесообразным в этой книге посвятить предварительную главу ньютоновской механике. Можно добавить, что статья Эйнштейна вызвала бурную реакцию, поскольку заставила нас радикально пересмотреть те фундаментальные формы человеческого представления, которые мы называем пространством и временем.

После обсуждения специальной теории мы перейдем к рассмотрению общей теории Эйнштейна, которую он начал разрабатывать в 1912 году и завершил в 1916 году. Общая теория в большей степени касается гравитации, хотя она также проливает новый свет на проблему относительности движения. Мы считаем, что читатель избавит себя от многих ненужных хлопот, если с самого начала поймет, что Эйнштейну даже в общей теории не удалось установить полную относительность всех видов движения. Хотя ускорение действительно теряет большую часть своей абсолютности, мы все еще далеки от того, чтобы согласиться с очень широким визуальным или кинематическим принципом, который был бы необходим для полной относительности всех видов движения.

Вслед за общей теорией Эйнштейн перешел к космологическим рассуждениям о форме Вселенной в целом. Эта часть теории по-прежнему носит в высшей степени спекулятивный характер, и до тех пор, пока астрономические наблюдения за шаровыми скоплениями и Млечным Путем не дадут своего вердикта, ничего определенного сказать нельзя.

С точки зрения относительности движения, эта последняя часть теории Эйнштейна представляет огромный интерес, поскольку, если она окажется верной, относительность всех видов движения может быть окончательно оправдана, а страшилище абсолютного вращения развеяно навсегда. Тогда мы пришли бы к модифицированной форме визуального или кинематического принципа полной относительности движения, а именно к механике Маха. С другой стороны, если астрономические наблюдения опровергнут правильность космологических взглядов Эйнштейна, теория не сможет установить полную относительность всех видов движения.

В дополнение ко всей этой предварительной физической информации, с которой необходимо ознакомиться (ньютонова механика, электродинамика) перед тем, как

приступить к изучению теории Эйнштейна, необходимо овладеть значительным объемом чисто математических знаний. Здесь мы имеем в виду не саму технику вычислений, а общее значение математических учений, разработанных великими математиками прошлого.

Теория Эйнштейна, особенно ее вторая часть (общая теория), тесно связана с открытиями геометров, занимавшихся неевклидовой геометрией, в частности Римана. Действительно, если бы не работа Римана и значительное расширение, которое она придала нашему пониманию проблемы пространства, общая теория Эйнштейна никогда бы не возникла. Как выразился Вейль:

«Риман оставил реальное развитие своих идей в руках какого-то последующего ученого, чей гений как физика мог бы сравниться с его собственным гением как математика. Спустя семьдесят лет эту миссию выполнил Эйнштейн».

В общем плане можно сказать, что до открытия неевклидовых пространств существовали две противоположные философские концепции. Некоторые мыслители, склонявшиеся к взглядам Беркли, утверждали, что понятие пространства возникло из комплекса наших переживаний, главным образом из синтеза наших зрительных и тактильных впечатлений. Другие, такие как Кант, утверждали, что концепция трехмерного евклидова пространства предшествовала любому разуму и опыту и была по сути *априорной*, формой чистой чувствительности. Как и в случае с относительностью движения, дискуссии могли бы продолжаться бесконечно, если бы не работа психофизиков и математиков. Последние разрешили вопрос, доказав, что Беркли был прав, по крайней мере в общем плане. Суть открытий Римана заключается в том, что он показал, что существует огромное количество возможных типов пространств, и все они абсолютно самосогласованны. Поэтому, когда речь заходит о том, каким из этих возможных пространств окажется реальное пространство, мы не можем заранее судить об этом. Только эксперимент и наблюдение могут дать нам подсказку. В первом приближении эксперимент и наблюдение доказывают, что пространство является евклидовым, и это объясняет нашу естественную веру в истинность евклидовых аксиом, принятых как верные исключительно по силе привычки. Но эксперимент неизбежно неточен, и мы не можем предсказать, не придется ли нам изменить свои мнения, когда наши эксперименты будут проводиться с большей точностью. Таким образом, взгляды Римана ставят проблему пространства на эмпирическую основу, исключая все *априорные* утверждения по этому вопросу.

Конечно, эти открытия математиков предшествуют теории Эйнштейна на целых семьдесят лет. Они являются прямым результатом неевклидовой геометрии и никоим образом не зависят от судьбы теории Эйнштейна. Но, с другой стороны, теория относительности очень тесно связана с этой эмпирической философией, поскольку, как будет объяснено позже, Эйнштейн вынужден прибегнуть к изменяющемуся неевклидовому пространству-времени с четырьмя измерениями, чтобы с предельной простотой объяснить гравитацию. Очевидно, что если бы расширение Вселенной было ограничено априорно, как бы указом, трехмерным евклидовым пространством, теория Эйнштейна была бы отвергнута на основании первых принципов. С другой стороны, как только мы признаем, что фундаментальное континуум Вселенной и его геометрия не могут быть постулированы *априори* и могут быть раскрыты нам только экспериментально и измерением, открывается огромное количество возможностей. Среди них четырехмерное пространство-время относительности с его различными степенями неевклидовости находит свое место.

ЧАСТЬ I
ФИЗИКА ДО РЕЛЬЕВАТИВНОСТИ

ГЛАВА I

МНОЖЕСТВЕННОСТИ

В этой главе мы будем заниматься исключительно многообразиями и их размерностью, а не их метриками, которые относятся к совершенно другой проблеме.

Все мы обладаем неким инстинктивным пониманием того, что означает непрерывность. Мы замечаем, например, что звуки, цвета или тактильные ощущения плавно переходят в другие звуки, цвета или тактильные ощущения, без каких-либо резких переходов. Совокупность таких непрерывных ощущений составляет то, что называется *сенсорным континуумом* или *непрерывным многообразием*. То, что непрерывность является концепцией, вытекающей из опыта, вряд ли можно подвергнуть сомнению, и это можно объяснить неспособностью наших грубых чувств различать почти одинаковые впечатления.

Рассмотрим, например, последовательность музыкальных нот, представленных в хроматической гамме на фортепиано. Здесь мы не имеем дело с сенсорным континуумом, поскольку последовательные звуки не сливаются друг с другом незаметными переходами. Даже нетренированный слух может различить ноту «*C*» и следующую за ней ноту «*C* - sharp». Но мы можем представить себе фортепиано, в котором было бы вставлено достаточное количество полутонов и промежуточных нот, чтобы каждая нота была неотличима от непосредственно следующей за ней и непосредственно предшествующей ей, хотя мы все равно могли бы различать несмежные ноты. Таким образом, мы могли бы пройти через непрерывную цепочку звуков от любого музыкального звука к любому другому, и наше ухо никогда не смогло бы обнаружить внезапного скачка; и это то, что мы имеем в виду, называя совокупность звуков *сенсорным континуумом*.

Предположим теперь, что мы удалили бы любую из этих нот из нашего фортепиано (за исключением двух крайних). Непрерывность нашей цепочки звуков была бы нарушена, поскольку, достигнув отсутствующей ноты, мы обнаружили бы внезапное изменение высоты тона при переходе от звука, непосредственно предшествующего удаленной ноте, к звуку, непосредственно следующему за ней. Короче говоря, удаление одной из нот разделило бы нашу непрерывную цепочку звуков на две части.

Размерность нашего континуума звуков, очевидно, равна единице, поскольку мы можем присвоить последовательные номера последовательным нотам, начиная с какой-либо стандартной ноты, и таким образом определить их без двусмысленности.

Давайте немного усложним задачу, предположив, что каждая отдельная нота может звучать с различной интенсивностью, но всегда таким образом, что нота заданной интенсивности никогда не может быть отличена от ноты, звучащей чуть громче или чуть тише. И снова мы сможем непрерывно переходить от ноты слабой интенсивности к той же ноте, звучащей с большей интенсивностью, при этом наше ухо никогда не сможет обнаружить изменение интенсивности между двумя последовательными звуками. В более общем плане мы сможем плавно переходить от ноты заданной высоты и заданной интенсивности к ноте другой высоты и другой интенсивности.

В рассматриваемом случае мы имеем дело с двумерным континуумом или непрерывным многообразием звуков; ведь для того, чтобы определить местонахождение определенного звука, нам необходимо обозначить его двумя числами, одно из которых указывает его

высоту, а другое — интенсивность. Мы также можем заметить, что в то время как в первом случае, удалив одну из нот, мы смогли разделить многообразие последовательных высот на две части, удаление одной конкретной ноты определенной высоты и интенсивности теперь не сможет произвести это разделение.

Например, если бы мы удалили ноту D , звучащую с определенной интенсивностью, все равно было бы возможно непрерывно перейти от любой ноты заданной интенсивности к любой другой ноте нашего континуума, обойдя отсутствующую ноту, а именно, выбрав некоторый путь перехода, который прошел бы через D , отличающуюся по интенсивности от D , которую мы удалили.

В данном случае, если бы мы хотели разделить наше двумерное многообразие на две части, необходимо было бы удалить некоторое одномерное континуум звуков, например, одномерное континуум, образованное всеми нотами заданной высоты D , но различающимися по интенсивности, или, опять же, заданной интенсивности, но различающимися по высоте. Если бы это было сделано, нам было бы невозможно плавно перейти от ноты определенной высоты и интенсивности нашего двумерного континуума к ноте любой другой определенной высоты и интенсивности, поскольку мы никогда не смогли бы пройти мимо удаленной линии звуков, не почувствовав внезапного изменения.

Мы могли бы еще больше усложнить дело, приняв во внимание вариации в тональности, как, например, вариации, которые наше ухо может уловить между двумя данными нотами одинаковой высоты и интенсивности, звучащими на двух разных инструментах, таких как скрипка и орган. Предполагая, что каждая из наших нот заданной высоты и интенсивности в нашем двумерном многообразии может также варьироваться по тональности на незаметные степени, мы будем иметь дело с трехмерным сенсорным континуумом, в котором каждая нота заданной высоты, интенсивности и тональности может быть однозначно определена выбором трех чисел.

Как и ранее, мы должны были бы обнаружить, что удаление одной ноты заданной высоты, интенсивности и тональности или даже удаление одномерного континуума нот, таких как все ноты заданной интенсивности и высоты, но различающиеся по тональности, было бы совершенно недостаточным для осуществления разделения в нашем трехмерном многообразии. В данном случае мы должны были бы иметь, чтобы удалить некоторое двумерное континуум — скажем, все ноты заданной интенсивности, но различающиеся по высоте и тональности. Только тогда мы смогли бы осуществить разделение между любым данным элементом и любым другим, сделав невозможным продолжение звуковых впечатлений между двумя элементами. Продолжая действовать таким образом бесконечно, мы, очевидно, можем представить себе сенсорные континуумы любого числа измерений; нет необходимости ограничиваться тремя.

Таким образом, в общем случае мы можем сказать, что сенсорный континуум является n -мерным (n -dimensional), когда для того, чтобы сделать невозможным непрерывный переход между любыми двумя его элементами, необходимо удалить подконтинуум (sub-continuum) с меньшим количеством измерений ($n - 1$). $n - 1$ Это подпространство само по себе является n -мерным, поскольку мы можем разделить его на две части, удалив из него подпространство с размером $n - 2$ и т. д., пока в конце концов не получим под-под-под... пространство, которое можно разделить, удалив один элемент. Но такой элемент больше не составляет континуум, поскольку прохождение через него исключено; его размерность тогда равна нулю; так что континуум, который он разделяет на две части, очевидно, является одномерным.

Сенсорное континуум также может быть представлено последовательностью весов, помещенных на руку, каждый из которых лишь немного тяжелее предыдущего. Опять же, наши тактильные ощущения могут дать сенсорное континуум. Учитывая тот факт, что можно объяснить возникновение понятия пространства даже в сознании слепого человека исключительно с помощью его тактильных ощущений, может быть интересно кратко обсудить иллюстрацию тактильного континуума, полученную путем исследования поверхности нашей кожи с помощью уколов булавкой. Если эти уколы будут достаточно близки друг к другу, нам будет невозможно различить их, и мы всегда будем ощущать только один укол. Таким образом, мы можем рассматривать сенсорное континуум, получаемое с помощью определенной цепочки уколов, простирающейся, скажем, от нашего локтя до руки. Эта конкретная цепочка ощущений обладает всеми характеристиками одномерного сенсорного континуума, поскольку каждый из ее элементов неотличим от своих непосредственных соседей, а удаление одного из этих элементов (уколов) создаст разрыв, который не позволит нам непрерывно пройти по цепочке от локтя до руки.

Но если мы теперь рассмотрим все возможные цепочки уколов, простирающиеся от точки на нашем локте до точки на нашей руке, то простое удаление одного конкретного укола из одной конкретной цепочки будет недостаточно, чтобы помешать непрерывному переходу. Мы всегда можем следовать по одной из других цепочек или даже, следуя по той же цепочке до отсутствующего элемента, обойти его, не нарушая сенсорной непрерывности. В данном случае единственный способ сделать это непрерывное прохождение невозможным — удалить какую-то непрерывную цепочку уколов, например, те, которые окружают наше запястье. Чувствительное кожное континуум теперь было бы разделено на две части, и, поскольку удаленное континуум было одномерным, мы должны были бы заключить, что кожный континуум (), проявляющий свою чувствительность к тактильным стимулам, был двумерным.

Аналогичным образом, в простой геометрии мы признаем провод одномерным, поскольку, удалив точку провода, наш палец не может непрерывно пройти от одного конца к другому. Точно так же поверхность считается двумерной, потому что только разрезав ее по линии, можно прервать плавный переход нашего пальца от любой одной точки к любой другой. Простое удаление точки на поверхности не мешало бы непрерывному переходу, как в случае с проволокой. То же самое и с объемом. Только поверхность может разделить его на две части; следовательно, объем является трехмерным.^[3]

Когда мы пытаемся определить размерность пространства восприятия, которое само по себе является сенсорным континуумом, созданным суперпозицией визуального, тактильного и моторного континуумов, проблема становится более сложной. Однако можно обнаружить, что пространство восприятия имеет три измерения; но поскольку необходимые объяснения потребовали бы нескольких глав, мы должны отправить читателя к глубоким трудам Пуанкаре для получения более полной информации.

Подводя итог, можно сказать, что наша вера в трехмерность пространства может быть объяснена на основании сенсорного опыта.

До настоящего момента предметом наших исследований была размерность сенсорных континуумов и общие характеристики сенсорной непрерывности; вопросы, связанные с измерением или с равенством протяженности двух непрерывных отрезков в наших континуумах, не затрагивались. На данном этапе также не было дано определение понятия «прямая линия». В результате невозможно обсуждать метрическую геометрию, которая занимается измерениями, и проективную геометрию, которая занимается проекциями точек. Единственный тип геометрии, который мы можем рассматривать на данном этапе, —

это чисто качественный неметрический тип, называемый *анализом situs*, который занимается исключительно проблемами связности.

Связность относится к типам путей непрерывного перехода от одной части континуума к другой. Многообразия могут иметь одинаковую размерность, но различаться по связности. Так, связность сферы отличается от связности тора или кольца, поскольку кольцо, в отличие от сферы, имеет отверстие или разрыв в центре. Однако и сфера, и кольцо являются двумерными поверхностями.

В аналитической геометрии метрические соображения, очевидно, не играют никакой роли. С метрической точки зрения, хотя сфера отличается по форме от эллипсоида, связность или аналитическая геометрия этих двух поверхностей абсолютно одинакова. Можно добавить, что для каждого непрерывного многообразия существует аналитическая геометрия, так что мы можем представить себе аналитическую геометрию n -мерного пространства, соответствующую n -мерному многообразию.

Наша следующая задача — определить, как можно установить метрику в сенсорном континууме. Рассмотрим, например, непрерывный переход оттенков серого от белого к черному. Что мы имеем в виду, когда говорим, что один оттенок в два раза темнее другого? Очевидно, что этому утверждению нельзя придать определенного значения, пока мы не установим некоторое соглашение, позволяющее нам проводить сравнения.

В качестве другого примера возьмем непрерывный поток звуков, различающихся по высоте. Что мы имеем в виду, когда говорим, что какая-то конкретная музыкальная нота в два раза выше по высоте, чем другая, или что интервал между двумя нотами равен интервалу между двумя другими? Если бы мы руководствовались исключительно своим слухом, мы могли бы утверждать, что, поскольку некоторые музыкальные ноты, хотя и различающиеся по высоте, тем не менее, кажутся имеющими некое неопределимое сходство (последовательные октавы), интервалы между этими последовательными сходными нотами следует считать равными или конгруэнтными. Таким образом, мы должны были бы определить как равные промежутки между нотами, составляющими последовательные октавы данной музыкальной ноты.

Но если бы мы научились измерять частоту колебаний различных музыкальных звуков, то сразу же возникла бы идея о новом типе измерения. Начиная с любой музыкальной ноты, например, средней ноты «до» (A) на фортепиано, мы обнаружили бы, что октава «до-диез» (A) колеблется в два раза быстрее, следующая октава «ре-диез» (E) — в три раза быстрее, а вторая октава нашей исходной ноты «до» (A) — в четыре раза быстрее. Тогда было бы правдоподобно определять равные интервалы между музыкальными нотами по разнице в их частоте колебаний, и мы должны были бы сделать вывод, что расстояние между A и его первой октавой равно расстоянию между этой последней нотой и следующей E , и снова равно расстоянию между этой E и следующей супероктавой A .

Таким образом, мы получили бы определение равных интервалов звуков, которое противоречило бы нашему первоначальному определению, в котором все октавные интервалы считались равными или конгруэнтными. Учитывая эти противоречивые результаты, мы не могли бы избежать вывода о том, что сенсорное континуум само по себе не дает нам точных средств для определения равных интервалов, и что любое определение, которое мы в конечном итоге выберем, будет лишь вопросом выбора, произвольно установленной конвенцией.

И все же в случае пространства, которое само по себе является сенсорным континуумом, люди без труда пришли к соглашению об общей системе измерений. Как мы увидим в следующих главах, определение равенства различных отрезков пространства, к которому люди были неизбежно приведены, было навязано им поведением определенных тел, расположенных в пространстве, тел, которые считались жесткими и, следовательно, занимали равные объемы и равные отрезки пространства, где бы они ни находились. Однако на данный момент мы можем оставить в стороне эти метрические соображения и сосредоточить свое внимание на общем понятии математического или геометрического пространства, которое является предметом изучения чистого математика.

Понятие сенсорного континуума, а значит, и воспринимаемого пространства, как оно представляется нам на основе грубого опыта, содержит определенные противоречия и особенности, которые необходимо было устранить, прежде чем подвергнуть его строгому математическому анализу. Во-первых, это воспринимаемое пространство не является однородным, а принцип достаточного основания требует, чтобы чистое пустое концептуальное пространство было однородным и изотропным, одинаковым везде и во всех направлениях.

Эта однородность пространства позволяет нам предвидеть, что оно должно быть безграничным, поскольку граница предполагала бы разрыв структуры, определяя внутреннюю и внешнюю стороны, а значит, отсутствие однородности. До открытий Римана считалось, что отсутствие границы предполагает бесконечность пространства. Сегодня мы знаем, что это убеждение неоправданно, поскольку пространство может быть конечным и в то же время безграничным; математики открыли два основных вида таких пространств.

Но внутренние противоречия, присущие всем сенсорным континуумам, стали еще более важной причиной, заставившей математиков идеализировать пространство восприятия. Как мы видели, в сенсорном континууме ощущение A не может быть отлучено от его непосредственного последователя, ощущения B ; так же как B не может быть отлучено от C . Однако нет никаких трудностей в различении A от C . В математическом выражении эти факты дают несогласованную серию отношений $A = B$; $B = C$; $C \neq A$. Теперь, несоответствие такого рода исключает любую математическую обработку. В математике величины не могут быть одновременно равными и неравными; они должны быть либо одними, либо другими. Поэтому математик вынужден идеализировать сенсорное континуум опыта, предполагая, что если бы не грубость наших чувств, точки или ощущения A , B и C были бы различимы, и что вместо $A = B$; $B = C$ и $A \neq C$ у нас были бы $A \neq B$; $B \neq C$; $C \neq A$.

Но очевидно, что идеализированное таким образом непрерывное пространство становится атомарным или дискретным, поскольку между A и B , как и между B и C , не упоминаются промежуточные точки. Чтобы восстановить непрерывность, математик вынужден постулировать, что между любыми двумя точками A и B существует неопределенное количество промежуточных точек, так что ни одна из этих точек не имеет непосредственного соседа. Другими словами, непрерывное пространство бесконечно делимо.

Таким образом, величины 1 и 2 не являются соседями, поскольку между ними находится ряд рациональных дробей. И ни две из этих дробных чисел не являются непосредственными соседями, поскольку какие бы два таких числа мы ни выбрали, мы всегда можем обнаружить неопределенное количество других дробных чисел, существующих между ними. Между любыми двумя точками на линии в нашем континууме, как бы близко они ни находились друг к другу, мы таким образом вставляем неопределенное количество

рациональных дробей, определяющих точки; однако, несмотря на это, мы ни в коем случае не устраняем промежутки между различными точками вдоль нашей линии.

Греческий математик Пифагор был первым, кто обратил внимание на этот недостаток после изучения определенных геометрических построений. Он заметил, например, что если мы рассмотрим квадрат, стороны которого имеют длину единицы, то диагональ квадрата (в результате его знаменитой геометрической теоремы о квадрате гипотенузы) будет равна $\sqrt{2}$. Теперь, $\sqrt{2}$ является иррациональным числом и отличается от всех обычных дробных или рациональных чисел. Следовательно, поскольку все точки прямой соответствуют рациональным или обычным дробным числам, было очевидно, что противоположный угол квадрата будет определять точку, которая не принадлежит диагонали. Другими словами, стороны квадрата, встречающиеся в противоположном углу от того, откуда была проведена диагональ, не пересекались бы с диагональю; и мы должны были бы прийти к выводу, что две непрерывные линии могут пересекаться в плоскости и при этом не иметь общей точки.

Единственным способом устранить эту трудность было предположить, что точка, соответствующая $\sqrt{2}$, и в общем случае точки, соответствующие всем иррациональным числам (таким как π , e и радикалы), все-таки присутствуют на непрерывной математической линии. Соответственно, математическая непрерывность вдоль линии была определена включением всех чисел, рациональных или иррациональных, и аналогичная процедура была применена к математическому континууму любого числа измерений. Таким образом, математики получили то, что известно как **Большой континуум**, или **Математический континуум**.^[41]

Теперь очевидно, что, хотя математическое континуум по-прежнему называется континуумом, оно значительно отличается от популярного представления о континууме, где каждый элемент сливается со своим соседом. Как бы то ни было, математическое континуум и, вместе с ним, математическая непрерывность, являются максимально возможным для математиков приближением к сенсорному континууму и сенсорной непрерывности. Само сенсорное континуум исключено из математического рассмотрения из-за присущих ему несоответствий.

И здесь необходимо отметить важный момент. В сенсорном континууме, рассматриваемом как цепочка элементов, понимание близости или *смежности*, а значит, и понимание порядка, навязывалось нам суждениями об идентичности в наших сенсорных восприятиях. Но то же самое больше не верно в случае математического совокупности точек из-за отсутствия того условия слияния, которое направляло нас в сенсорных многообразиях. Теоретически мы можем с одинаковой обоснованностью упорядочить эти точки любым выбранным нами способом, и, изменяя порядок, в котором мы переходим от точки к точке, мы должны обнаружить, что размерность совокупности изменяется соответственно.^[51]

Таким образом, размерность является свойством порядка, и порядок должен быть установлен, прежде чем можно будет определить размерность.

На практике геометр сохранит тип отношения упорядочения, навязанного нашим сенсорным опытом, и абстрактно представит математическое пространство точек, которое будет проявляться как трехмерное, когда это отношение упорядочения соблюдается. Однако ничто не мешает ему представить математические пространства любого целого числа измерений, либо путем изменения отношения упорядочения, либо путем моделирования своего математического многообразия на основе некоторого n -мерного сенсорного континуума.

Предположим, что мы представили себе трехмерное математическое пространство, полученное как абстракция от трехмерного пространства обычного опыта. Так же, как и в случае с нашим сенсорным континуумом, математический континуум будет аморфным; он не будет иметь внутренней метрики, следовательно, не будет представлять нам никакой определенной геометрии. Определение конгруэнтности, то есть равенства двух пространственных отрезков и, в более общем случае, двух объемов, а также тождества форм и размеров, останется таким же условным, как и раньше; и только после того, как мы введем соглашения об измерении в иначе безразличное математическое пространство, станет возможной метрическая геометрия в противоположность анализу *situs*. Однако обсуждение этих моментов будет отложено до следующих глав.

ГЛАВА II

РОЖДЕНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

В предыдущей главе мы упомянули, что понятие непрерывности было предложено нашими сенсорными ощущениями; и что наше понимание пространства как трехмерного континуума возникло из синтеза наших различных сенсорных впечатлений. В настоящей главе мы будем больше заниматься геометрией пространственного континуума; и мы покажем, как измерение, в свою очередь, возникло из опыта, в частности из визуального опыта.

Для этой цели рассмотрим случай неподвижного наблюдателя, привязанного к земле с момента своего рождения — своего рода человека-растения. Глядя на мир с того места, где он стоит, он заметит, что в то время как некоторые зрительные впечатления проявляют свойство, которое он признает как «постоянство», другие представляются ему как извивающиеся формы, движущиеся по его полю зрения. Чтобы упростить обсуждение, мы не будем учитывать сознательные усилия нашего наблюдателя по фокусировке зрения, а также его восприятие конвергенции глаз. В этих условиях его зрительные восприятия раскрывали бы мир двух измерений, «вверх и вниз, вправо и влево»; третье измерение, с которым мы все знакомы, *то есть* «прочь и к», отсутствовало бы. В результате, извивающиеся формы, проходящие через его поле зрения, будут интерпретированы как отражение двумерного мира меняющихся форм, который никоим образом не будет связан с существованием третьего измерения. В частности, у него не будет никаких оснований приписывать эти изменения изменениям расстояний между твердыми материальными объектами и его наблюдательным пунктом.

Но предположим, что одновременно с проявлением своей воли наш наблюдатель стал бы осознавать определенные мышечные усилия, сопровождающие изменение форм тех объектов, которые до сих пор оставались неподвижными и не деформированными в его поле зрения. В обычном языке наш наблюдатель смещал бы свое место наблюдения, то есть «ходил». Он больше не оставался бы неподвижным, как дерево. В результате этих перемещений, которые он в конце концов признал бы таковыми, не только формы, ранее фиксированные по форме, казались бы изменяющимися, но, наоборот, некоторые формы, до сих пор извивавшиеся, могли бы сохранять неизменный вид. В конце концов, он осознал бы, что в тех случаях, когда изменения формы и размера можно было бы компенсировать соответствующими смещениями своего наблюдательного поста, он наблюдал бы, как твердые тела изменяют свое расстояние по третьему измерению по отношению к нему. Таким образом, возникло бы понимание как твердых тел, так и третьего измерения. Кроме того, благодаря его способности повторять свои эксперименты *здесь* и *там*, последовало бы осознание однородности пространства.

Таким образом, мы видим, что трехмерное пространство опыта, по-видимому, возникло в результате синтеза частных точек зрения, каждая из которых принадлежала бы наблюдателю, неспособному двигаться с определенного фиксированного места. Этот синтез был бы чрезвычайно сложным; к сожалению, у нас нет времени упоминать о различных условиях, которые пришлось бы принимать во внимание. Достаточно сказать, что наши чувства зрения, осязания, мышечного усилия, слуха и обоняния, к которым следует также добавить действие полукружных каналов, все играли бы свою роль, взаимодействуя друг с

другом. Дальнейшие рассуждения также покажут, что нет ничего загадочного в том, что эти различные данные дают согласующиеся результаты, а не несовместимый набор противоречивых пространств.

Все, что мы хотим подчеркнуть, это то, что под физическим пространством опыта мы не имеем в виду просто пространство с расположенными в нем объектами, как это могло бы показаться с какой-то определенной точки наблюдения. Мы не имеем в виду личное видение, в котором рельсы сходятся, а удаленные объекты кажутся меньшими; мы имеем в виду синтез этих личных перспектив, дающий нам общее публичное пространство.

Одна частная точка зрения с ее сходящимися рельсами, взятая сама по себе и рассматриваемая без ссылки на другие точки зрения, не могла бы содержать достаточных данных, чтобы позволить нам представить себе трехмерное пространство, однородное и изотропное.^[6] То, что этот синтез был достигнут без сознательных усилий разума, не вызывает сомнений. Тем не менее, хотя и инстинктивная, координация частных переживаний и точек зрения является весьма сложной задачей; и не было бы невозможно представить себе эту координацию, следующую другим принципам, так же как совокупность книг может быть упорядочена в алфавитном порядке, по размеру или по содержанию и т. д. Изменив порядок сортировки, мы могли бы получить пространство с большим количеством измерений. Однако, несомненно, если принять во внимание факты опыта, трехмерная координация является гораздо более простой; поэтому нет причин удивляться тому, что она навязала себя с такой силой. Этих слишком кратких указаний должно быть достаточно на данный момент.

А теперь вернёмся к проблеме измерения. Мы упомянули, что в некоторых случаях можно было бы, изменив место наблюдения, компенсировать видимые изменения в визуальных формах тел, которые подверглись смещению в нашем поле зрения.

Например, если бы мы получили визуальное впечатление, соответствующее кругу, и если бы за этим впечатлением последовало впечатление, соответствующее треугольнику, и если бы нам было невозможно восстановить круглое впечатление, мы должны были бы предположить, что тело изменило свою форму (); тогда как, если бы было возможно восстановить круглое впечатление, приложив определенные усилия (что в конечном итоге было бы интерпретировано как смещение нашей точки наблюдения), мы в конечном итоге должны были бы предположить, что мы стали свидетелями частичного вращения жесткого конусообразного объекта.

Это открытие жестких объектов в природе имеет фундаментальное значение. Без него концепция измерения, вероятно, никогда бы не возникла, и метрическая геометрия была бы невозможна. Но с открытием объектов, которые были признаны жесткими, а значит, сохраняющими одинаковый размер и форму при любом смещении, было вполне естественно обратиться к ним как к стандартам пространственного измерения.

Измерения, проведенные таким образом, вскоре доказали бы, что между любыми двумя точками определен вид линии, называемый прямой линией, дает наименьшее расстояние; а это, в свою очередь, подсказало бы использование прямых измерительных стержней. Отныне два прямых стержня считались бы равными или конгруэнтными, если при соединении их концы совпадали. Что касается физического определения прямолинейности, то к нему можно было прийти несколькими способами: либо натянув веревку между двумя точками, либо обратившись к свойствам самих этих жестких тел. Например, две линейки считались бы прямыми, если бы после совпадения при размещении вдоль друг друга они продолжали совпадать, когда одна линейка переворачивалась на себя.

Наконец, параллелограммы строились бы путем образования четырехугольника из четырех равных стержней, и таким образом была бы определена параллельность.

Вооружившись таким образом, первые геометры (например, те, кто строил пирамиды) смогли выполнять измерения на поверхности Земли, а затем изучать геометрию твердых тел, или пространственную геометрию. Благодаря своим грубым измерениям они, по всей вероятности, пришли к приблизительному эмпирическому установлению ряда положений, правильность которых было предначертано доказать с математической точностью греческим геометрам. Таким образом, нет ни малейшего сомнения в том, что геометрия в своем происхождении была по сути эмпирической и физической наукой, поскольку сводилась к изучению возможных расположений объектов (признанных жесткими) по отношению друг к другу и к частям Земли. Фактически, само слово «геометрия» убедительно доказывает этот тезис.

Теперь, эмпирическая наука обязательно является приблизительной, а геометрия, как мы ее знаем сегодня, является точной наукой. Она утверждает, что сумма трех углов евклидова треугольника равна 180° , ни на долю больше, ни на долю меньше. Очевидно, что никакое эмпирическое определение не может претендовать на такую абсолютную достоверность. Соответственно, геометрия должна была подвергнуться глубокой трансформации, и это было сделано греческими математиками Фалесом, Демокритом, Пифагором и, наконец, Евклидом.

Сложность, с которой столкнулся Евклид, заключалась в том, чтобы точно определить, что он понимает под прямой линией и равенством двух расстояний в пространстве. До тех пор, пока геометрия находилась в эмпирической стадии, эти определения были достаточно простыми. Достаточно было сказать: «Два твердых стержня будут признаны прямыми, если после поворота одного из них они по-прежнему остаются в идеальном контакте» или «Расстояние между двумя концами материального стержня по определению остается неизменным, куда бы мы ни перенесли стержень».

Однако Евклид не мог прибегать к таким приблизительным эмпирическим определениям, поскольку его целью была абсолютная строгость. Соответственно, он был вынужден прибегнуть к косвенным методам. Позиционируя систему аксиом и постулатов, он стремился точно сформулировать свойства, которые были представлены только приблизительно твердыми телами в природе. Таким образом, геометрия Евклида была геометрией идеально жестких тел, которые, хотя и были идеализированными копиями тел, обычно считающихся жесткими в мире опыта, все же были определены таким образом, чтобы не быть загрязненными неточностями, сопутствующими всем физическим измерениям.

Но это эмпирическое происхождение геометрических аксиом и постулатов Евклида было упущено из виду, более того, оно даже не было осознано. В результате считалось, что евклидова геометрия черпает свою достоверность из определенных самоочевидных универсальных истин; она казалась единственным типом последовательной геометрии, который мог вообразить ум. Гаусс имел определенные сомнения по этому поводу, но не имел смелости опубликовать свои результаты из-за страха «возмущения беотийцев». В любом случае, честь открытия неевклидовой геометрии досталась Лобачевскому и Больяи.

Короче говоря, было обнаружено, что, изменяя одно из фундаментальных предположений Евклида, известное как **параллельный постулат**, можно построить две другие геометрические доктрины, абсолютно последовательные во всех отношениях, хотя и сильно отличающиеся от евклидовой геометрии. Они известны как неевклидовы геометрии Лобачевского и Римана.

Параллельный постулат Евклида можно выразить следующим образом: через точку на плоскости всегда можно провести одну и только одну прямую, параллельную заданной прямой, лежащей на этой плоскости. Лобачевский отрицал этот постулат и предполагал, что можно провести бесконечное число непересекающихся прямых, а Риман предполагал, что провести ни одной нельзя.

Из этого различия в геометрических предпосылках вытекали важные различия. Так, в то время как в евклидовой геометрии сумма углов любого треугольника всегда равна двум прямым углам, в неевклидовой геометрии значение этой суммы зависит от размера треугольников. В геометрии Лобачевского она всегда меньше двух прямых углов, а в геометрии Римана () — всегда больше. Опять же, в евклидовой геометрии могут существовать подобные фигуры разных размеров; в неевклидовой геометрии это невозможно.

Поэтому казалось, что универсальная абсолютность истины, ранее приписываемая евклидовой геометрии, должна быть разделена этими двумя другими геометрическими доктринами. Но истина, лишенная своей абсолютности, теряет большую часть своего значения, поэтому сосуществование противоречивых универсальных истин привело к осознанию того, что геометрия является истинной только в отношении нашего более или менее произвольного выбора системы геометрических постулатов. С чисто рациональной точки зрения не было никакого способа решить, какая из нескольких согласованных систем была истинной. Характер самоочевидности, который ранее приписывался евклидовым аксиомам, оказался иллюзорным.

Однако есть ряд довольно деликатных моментов, которые необходимо рассмотреть, и мы сейчас приступим к их изучению. Параллельный постулат Евклида и альтернативные неевклидовы постулаты сводятся к косвенным определениям того, что мы намерены называть *прямой линией* в соответствующих упомянутых геометриях. Если бы существовала такая универсальная величина, как *абсолютная прямолинейность*, представленная, скажем, евклидовой прямой линией, мы могли бы утверждать, что евклидова геометрия является истинной геометрией, поскольку ее прямая линия соответствует идеалу абсолютной прямолинейности. Но существование универсальной величины, представляющей абсолютную прямолинейность, является именно одной из метафизических паутин, от которых наука избавилась благодаря открытию неевклидовой геометрии. Чтобы более полно проиллюстрировать этот момент, давайте предположим, что мы думаем, что знаем, что подразумевается под прямой линией. Независимо от того, просто ли мы представляем себе прямую линию или пытаемся реализовать ее конкретно, мы всегда сталкиваемся с одной и той же трудностью. Например, мы считаем, что стержень прямой, когда его можно перевернуть и наложить на себя, или же мы смотрим на один из его концов и замечаем, что на нем нет видимых неровностей. Кроме того, мы можем представить себе прямоту, натянув нить, посмотрев на отвес или траекторию бильярдного шара. Мы также можем выполнить измерения с помощью наших жестких стержней; прямая линия между любыми двумя точками будет тогда определена как кратчайшее расстояние. Но какой бы метод мы ни использовали, очевидно, что наше интуитивное восприятие прямооты в любом конкретном случае всегда будет основано на физических критериях, связанных с поведением лучей света и материальных тел. Мы можем закрыть глаза и думать о прямолинейности в абстрактном смысле сколько угодно, но в конечном итоге мы всегда должны представлять себе физические иллюстрации.

Предположим, что материальные тела, включая наше собственное человеческое тело, ведут себя по-разному при смещении. Если соответствующие изменения влияют на траекторию лучей света, то мы должны признать жесткость тел, которые с точки зрения

Евклида изгибаются при приведении в движение. В результате наша прямая линия, то есть линия, определяемая натянутой веревкой, наша линия зрения, кратчайший путь между двумя точками, больше не совпадала бы с евклидовой прямой линией. С евклидовой точки зрения наша прямая линия была бы изогнутой, но с нашей точки зрения все было бы наоборот: евклидова прямая линия теперь проявляла бы кривизну как визуально, так и в результате измерения. Супернаблюдатель, вызванный в качестве арбитра, сказал бы нам, что мы спорим ни о чем. Он сказал бы: «Вы оба правы, считая прямой то, что визуально представляется вам таким и что соответствует измерениям. Поэтому вам будет выгодно сохранить свои определения прямолинейности для линий, которые удовлетворяют этим условиям. Но вы оба неправы, когда придаете этому понятию какое-либо абсолютное значение, потому что вы должны понимать, что ваши мнения всегда будут зависеть от природы физических условий, которые вас окружают».

Кстати, теперь мы можем понять, почему аксиомы Евклида казались самоочевидными или, по крайней мере, навязанными разумом. Они представляли собой математические абстракции, полученные из опыта, из нашего опыта с лучами света и материальными телами, среди которых мы живем. Мы вернемся к этим деликатным вопросам в следующей главе. На данный момент отметим, что, поскольку наше суждение о прямолинейности зависит от открытий опыта, даже геометрия пространства, в котором мы фактически живем, не может быть определена *априори*. В первом приближении, конечно, эта геометрия кажется евклидовой, но мы не можем предсказать, какой она окажется, когда природа будет изучаться с все большей точностью. Именно с этой идеей Гаусс, который в тайне освоил последствия неевклидовой геометрии, более века назад предпринял триангуляцию с помощью лучей света. Более того, даже если бы геометрия была установлена для одной определенной области пространства, мы не могли бы утверждать, что наше понимание прямолинейности, а значит и геометрии, не может варьироваться от места к месту и от времени к времени; следовательно, мы не можем утверждать вместе с Кантом, что положения евклидовой геометрии обладают какой-либо универсальной истиной, даже если ограничиться этим конкретным миром, в котором мы живем.

Еще несколько лет назад такие дискуссии могли бы показаться чисто академическими, а неевклидова геометрия, несмотря на огромный философский интерес, могла бы показаться лишенной какого-либо практического значения. Но сегодня, благодаря Эйнштейну, у нас есть веские основания полагать, что сверхточные наблюдения природы показали, что наша естественная геометрия, полученная с помощью твердых тел и лучей света, является слегка неевклидовой и варьируется от места к месту. Таким образом, хотя геометры-неевклидовцы никогда не подозревали об этом (за исключением Гаусса, Римана и Клиффорда), наш реальный мир оказывается одним из миров-фантазий, возможное существование которых предвидели их математические гении.

Все эти исследования, начатые попытками доказать правильность параллельной постулаты, привели математиков к дальнейшим открытиям.

Более тщательное изучение аксиом и постулатов Евклида доказало их неадекватность для вывода геометрии Евклида. Сам Евклид никогда не смущался неполнотой своих основных посылок по той простой причине, что, хотя он и не смог явно выразить недостающие постулаты, он неявно апеллировал к ним в ходе своих доказательств. Великий немецкий математик Гильберт и другие ученые сумели восполнить этот пробел, явно сформулировав полную систему постулатов как для евклидовой, так и для неевклидовой геометрии. Среди постулатов, отсутствующих в списке Евклида, был знаменитый постулат Архимеда, согласно которому, расположив на линии бесконечное число равных отрезков, мы в конечном итоге должны пройти любую произвольно выбранную точку на этой линии.

Гильберт, отрицая этот постулат, так же как Лобачевский и Риман отрицали параллельный постулат Евклида, сумел построить новую геометрию, известную как неархимедова (). Она была совершенно последовательной, но гораздо более странной, чем классические неевклидовы разновидности. Аналогичным образом, было доказано, что можно построить систему постулатов, которая даст евклидову или неевклидову геометрию любого числа измерений; следовательно, с точки зрения рациональных требований разума, не было никаких причин ограничивать геометрию тремя измерениями.

Между прочим, мы видим, какой строгости анализа и какой глубокой интроспекции должен подчиняться математический ум; ведь неявные постулаты, к которым бессознательно апеллировал Евклид, настолько незаметны, что только благодаря диалектике современных математиков их наличие было наконец раскрыто, а недостаток устранен их явным формулированием.

Из всего этого довольно длинного обсуждения темы постулатов и аксиом мы видим, что аксиомы или постулаты геометрии, безусловно, не навязываются нам *априори* каким-либо единственным образом. Мы можем варьировать их многими способами, и, что касается реального пространства, единственная причина, по которой мы выбираем одну систему постулатов, а не другую (а значит, один тип геометрии в предпочтение другому), заключается в том, что она лучше согласуется с фактами наблюдения, когда принимаются во внимание твердые тела и лучи света. Таким образом, наш выбор диктуется мотивами прагматического характера; и кантианцы были совершенно неправы, когда предполагали, что аксиомы геометрии составляют априорные синтетические суждения, выходящие за пределы разума и опыта.

ГЛАВА III

ОТКРЫТИЯ РИММАНА И КОНГРУЕНЦИЯ

Процедура представления неевклидовой геометрии, которой мы следовали до этого момента, зависит от параллельного постулата, а значит, от определения прямой линии. Во многих отношениях гораздо более глубоким методом исследования был метод, примененный Риманом, основанный на концепции *конгруэнтности*. Под конгруэнтностью мы понимаем равенство двух расстояний и, в более общем смысле, двух объемов в пространстве. Как мы уже объясняли в другом месте, оба метода приводят к одинаковым результатам. Действительно, как только метрическая геометрия определена, будь то методом постулатов или каким-либо иным способом, из этого следует соответствующее определение прямой линии и равных или конгруэнтных расстояний.

Таким образом, в евклидовой геометрии конгруэнтные длины в разных местах иллюстрируются длинами, охватываемыми материальным стержнем, переносимым из одного места в другое. После определения конгруэнтных или жестких объектов прямая линия задается осью вращения материального тела, две точки которого являются фиксированными, или же кратчайшим расстоянием между двумя точками, измеренным с помощью нашего жесткого стержня.

Тем не менее, хотя различные методы представления эквивалентны, может быть целесообразно сделать определение конгруэнтности фундаментальным, а не определение прямой линии. Такой подход был использован Риманом.

Когда мы обращаемся к опыту для понимания конгруэнтности, мы находим ее примеры в жестких телах природы, геометрические расположения которых дают, более или менее точно, результаты чистой евклидовой геометрии. Если мы идеализируем конгруэнтность, как она определена выше, и выражаем ее математически, мы можем сказать, что идеально жесткие тела — это те, измерения которых дают евклидовые результаты с абсолютной точностью. Но хотя математик тем самым устранил из своих определений неточности, сопутствующие физическим измерениям, его понимание конгруэнтности сводится к простой идеализированной копии поведения особых тел, встречающихся в природе. Хотя он таким образом получил возможное математическое определение конгруэнтных тел (данное в природе), остается открытым вопрос, не возможны ли рационально и другие типы конгруэнтности. Поэтому его целью должно быть математическое определение конгруэнтности без обращения к опыту.

Однако, когда мы отбрасываем эмпирический критерий, который побудил нас определить материальные тела как жесткие, мы обнаруживаем, что единственное математическое определение жесткости ускользает от нас. Ведь сказать, что тело остается жестким или конгруэнтным с самим собой во время смещения, означает, что пространственное расстояние между его крайними точками остается неизменным. Но единственный способ раскрыть этот факт — это измерить тело с помощью, безусловно, жесткой линейки через определенные промежутки времени и отметить постоянство результатов измерений. Отсюда следует, что значение этих результатов будет сведено на нет, если мы усомнимся в жесткости нашей линейки. И как мы могли бы оправдать его жесткость, если бы не сравнили его с каким-либо другим стержнем, считающимся жестким, и так *до бесконечности*? Из всего этого следует, что тело можно считать жестким только по

отношению к нашему измерительному стержню; и чтобы придать какое-либо значение жесткости, мы должны сначала признать, что наш измерительный стержень является жестким по определению или по соглашению. У нас нет других средств для установления этой жесткости.

Мы должны прийти к тем же выводам, если сравним две длины AB и CD , расположенные в разных частях пространства. Мы не можем сказать, что эти две длины равны или совпадают в абсолютном смысле только потому, что наш измерительный стержень может совпадать то с AB , то с CD . Определение такого рода, очевидно, предполагало бы, что наш измерительный стержень остался недеформированным или конгруэнтным с самим собой при перемещении от AB к CD . Это свелось бы к проверке конгруэнтности AB и CD , предполагая, что мы знаем, как распознать сохранение конгруэнтности нашего стержня во время перемещения. Таким образом, определяя конгруэнтность с точки зрения конгруэнтности, мы попадаем в круг.

Вся проблема возникает из-за непрерывности пространства, которая не позволяет нам придавать какое-либо абсолютное значение утверждению, что две длины, расположенные в разных частях пространства, равны или неравны. Нет абсолютного значения в утверждении, что между A и B столько же пространства, сколько между C и D . Мы не можем сравнивать длины, считая количество точек, которые они содержат, поскольку между концами дюйма столько же точек, сколько между концами мили — в обоих случаях бесконечное количество. [\[17\]](#)

Короче говоря, мы видим, что в математических континуумах, как и в сенсорных, измерение и сравнение длин можно рассматривать только как результат некоторого соглашения; в самих континуумах нет ничего, что указывало бы на какие-либо определенные метрики или геометрию. Именно это имеется в виду, когда говорят, что пространство аморфно и не дает нам никаких средств для определения абсолютной формы и размера.

Теперь, из предыдущих обсуждений может показаться, что, поскольку определение равных расстояний является чисто условным, с точки зрения математика для этой цели можно выбрать любой концептуальный стержень. Мы могли бы взять стержень, который при перемещении извивался бы, как червь, и возвысить его до положения стандартного стержня, с которым должны были бы сравниваться все другие длины. Но это было бы слишком крайним решением, поскольку, хотя математическое пространство не обладает внутренними метрическими свойствами, тем не менее к линейкам предъявляются определенные требования, чтобы их можно было считать остающимися конгруэнтными при перемещении. Именно эти требования, сформулированные Риманом, мы и будем сейчас обсуждать. Риман предположил, что необходимые требования будут следующими:

Во-первых, он предположил, что если мы ограничимся бесконечно малыми объемами пространства, то конгруэнтность будет установлена с помощью евклидовых тел и измерительных стержней. Этот постулат называется *постулатом евклидовой геометрии в бесконечно малых величинах*.

Кроме того, если наши стержни остаются конгруэнтными и мы создаем с их помощью определенные конструкции (пирамиды и т. д.), мы должны иметь возможность переносить эти стержни и создавать точно такие же конструкции, представляющие точно такие же числовые соотношения, в любой другой части пространства. Этот постулат является лишь отражением нашей веры в однородность и изотропность измерений в пространстве,

одинаковых везде и в любом направлении. В слегка измененной форме она часто называется *постулатом свободной подвижности*.

Мы также можем сказать, что если два стержня совпадают в определенной области пространства, они должны продолжать совпадать, когда их разделить, а затем снова соединить в любой другой области.^[8]

С учетом этих ограничений Риман обнаружил, что евклидово измерение было лишь одним из многих. Возможны были также два других типа измерений: лобачевское и риманово.

Соф Ли рассматривал ту же проблему, но с другой точки зрения. Он утверждал, что твердое тело будет таким, что когда одна из его точек зафиксирована, любая другая его точка будет описывать поверхность. Когда одна из его линий зафиксирована, любая другая его точка будет описывать кривую, и, наконец, когда три точки зафиксированы, твердое тело не сможет двигаться.

В результате этих исследований было доказано, что существуют тела, которые, в отличие от евклидовых тел, изгибаются при смещении. Однако, несмотря на это, эти неевклидовы тела удовлетворяют всем математическим требованиям, предъявляемым к конгруэнтным телам. Эти альтернативные типы тел можно назвать соответственно римановыми телами и лобачевскими телами.

Если мы выберем евклидову конгруэнтность для измерения пространства, неевклидовы тела будут казаться изгибающимися при перемещении; если мы выберем неевклидову конгруэнтность, то евклидовы тела будут казаться изменяющимися по форме при перемещении. Однако обычно термин «жесткий» используется только для евклидовых тел, но это делается только для того, чтобы соответствовать обычному пониманию жесткости, основанному на опыте. Если мы не будем учитывать физическое поведение материальных тел, которое навязало нам определенное представление о жесткости, то, по-видимому, нет никаких математических оснований придавать евклидовым измерениям большее значение, чем неевклидовым. Отсюда следует, что неевклидовы тела имеют такое же право на название «жесткие», как и более известные евклидовы тела. Когда речь заходит о том, какой из типов жесткости представляет собой сохранение абсолютной формы и размера, проблема кажется совершенно бессмысленной. Соответственно, мы будем называть различные типы тел евклидово или неевклидово жесткими.

Теперь совершенно очевидно, что когда мы измеряем длины и соотношения длин с помощью того или иного типа стандартных стержней, мы получаем противоречивые числовые соотношения и значения. Таким образом, если мы закрепим один конец нашего стандартного стержня и позволим ему вращаться во всех направлениях, его свободный конец будет описывать точки на сферической поверхности, независимо от типа стержня или геометрии, с которой мы имеем дело. Аналогичным образом мы можем получить окружность. Если же мы будем придерживаться евклидовой системы измерений, то значение отношения длины окружности к диаметру будет оставаться неизменным, каким бы большим ни был диаметр; мы всегда будем получать одно и то же постоянное число, известное как π — равное 3,141592 ..., впервые вычисленное Архимедом. С другой стороны, при использовании римановых или лобачевских измерений мы получим переменное значение этого отношения, всегда меньшее, чем π в случае римановой геометрии, уменьшающееся с увеличением диаметра; и всегда большее, чем π в случае, если мы выбрали

лобачевские измерения . Аналогичные расхождения будут наблюдаться при измерении всех других геометрических фигур и углов.

И здесь есть еще один момент, который следует учитывать. Даже когда мы определили конкретный тип измерения, будь то евклидово или неевклидово, мы ни в коем случае не зафиксировали поведение наших стержней и тел в абсолютном смысле; и понимание абсолютной жесткости все еще ускользает от нас. Мы можем определить евклидовы тела, например, только как те, чьи законы расположения дают евклидовые числовые результаты. Следующая иллюстрация покажет нам, что эти тела могут все различаться по абсолютной форме при смещении, но все равно давать одинаковые евклидовые результаты.

Все, что нам нужно сделать, это рассмотреть прозрачную плоскость и человека, выполняющего геометрические построения с помощью евклидовых стержней на ее поверхности. Если мы рассмотрим точечный источник света, отбрасывающий тени этих стержней на какую-либо другую поверхность, плоскую или изогнутую, эти тени, рассматриваемые в свою очередь как измерительные стержни, все равно будут давать точно такие же евклидовы результаты , их законы расположения останутся неизменными, и, следовательно, они будут жесткими евклидовыми стержнями в точности в той же степени, что и исходные. Однако, в отличие от этих исходных линий, тени будут изгибаться при смещении, меняя форму и размер, а евклидовы прямые линии будут казаться кривыми.

Короче говоря, мы видим, что абсолютная форма, прямолинейность, размер и жесткость в концептуальном математическом пространстве полностью ускользают от нас, и значение жесткости как изображения сохранения неизменного объема пространства, даже при рассмотрении евклидовых тел, является неопределенным. В самом широком смысле это то, что математики подразумевают под относительностью пространства. Единственное оправдание общепринятого понятия жесткости в популярном смысле заключается в наличии в нашей вселенной материальных тел, которые мы согласны принимать в качестве стандартов. Кстати, они дают евклидовые результаты.

Подводя итог, мы видим, что математическое пространство аморфно; оно не имеет конкретной метрики, конкретной геометрии. В соответствии с нашими методами измерения мы можем получить ту или иную геометрию в одном и том же пространстве. Часто удобно выражать все эти результаты, говоря, что пространство является евклидовым, римановым или лобачевским; но мы должны быть осторожны и отметить, что само пространство имеет очень малое отношение к этому вопросу.

Давайте теперь рассмотрим другой аспект проблемы. До тех пор, пока мы не определились с выбором системы измерений, аморфная природа пространства не позволяет нам придать какое-либо определенное значение расстоянию между двумя точками. Это, в свою очередь, не позволяет нам придать какое-либо значение тому, что можно считать *кратчайшим* расстоянием между двумя точками. Однако, когда мы принимаем одну из трех конвенций измерения, значение кратчайшего расстояния становится определенным, и определенная линия, соединяющая две точки, будет воплощать это кратчайшее расстояние. Линии этого типа известны под названием *геодезических линий*; и в любой из геометрий, с которыми мы будем иметь дело, они играют ту же роль, что и прямая линия в евклидовой геометрии ([191](#)).

В соответствии с каждым из трех упомянутых нами определений конгруэнтности существует определенный тип прямой линии или геодезической линии между любыми двумя точками. С евклидовой конгруэнтностью мы получаем евклидову прямую линию, которая удовлетворяет параллельному постулату Евклида, и наоборот. Опять же, если мы принимаем один из двух неевклидовых типов конгруэнтности, мы приходим к

неевклидовым прямым линиям или геодезическим линиям, которые удовлетворяют неевклидовым постулатам, и наоборот. Короче говоря, мы видим, что два метода представления неевклидовой геометрии, либо через метрический или конгруэнтный метод, либо через метод параллельного постулата, в основном эквивалентны.

При более тщательном рассмотрении неевклидовой геометрии иногда используются другие неметрические методы представления. Один из них основан на теории групп и проективной геометрии; другой связан с открытиями Леви-Чивиты и Вейля и зависит от фундаментального понятия бесконечно малого параллельного смещения; он открывает путь к еще более общей геометрии Вейля. Еще один математический метод исследования пространства — метод непрерывных траекторий, который исследовали Айзенхарт и Веблен. В этой книге мы воздержимся от обсуждения этих более сложных методов, поскольку они представляют собой слишком технический аспект,⁽¹⁰⁾ но было бы большой ошибкой предполагать, что эти творческие полеты чистых математиков не имели никакой пользы для физической науки. Помимо глубокого философского света, который они проливают на всю проблему пространства, мы знаем из прошлого опыта, что то, что вначале было чистой математической мечтой, не раз становилось впоследствии образом физической реальности. Неевклидова геометрия и, возможно, еще более странная геометрия Вейля являются тому примером.

Теперь мы должны рассмотреть ряд вопросов, касающихся местоположения и движения в пространстве. Математическое пространство, как мы видели, является многомерным и аморфным (n). Но для того, чтобы приблизить его к физическому пространству опыта (3), мы можем предположить, что необходимые постулаты порядка и смежности были определены. Таким образом, мы получаем трехмерное математическое пространство. Теперь математическое пространство, ввиду своей аморфной природы, является по сути относительным. Сама однородность пространства, его одинаковость «здесь» и «там», не позволяет нам различать одно абсолютное положение от другого. Отсюда следует, что абсолютное движение, т. е. изменение абсолютного положения в пустом аморфном математическом пространстве, не может иметь никакого значения.

Единственным способом придать значение положению и движению будет выбор какой-либо трехмерной системы отсчета в качестве стандарта. Например, мы можем рассмотреть три взаимно перпендикулярные оси, пересекающиеся в одной точке. Более конкретную иллюстрацию можно получить, рассмотрев две смежные стены и пол нашей комнаты. Затем, выбрав стандартные стержни, которые мы намерены использовать, а также часы, мы должны приступить к измерению положения и изменения положения объекта по отношению к нашей комнате. Это даст нам относительное положение и движение объекта (по отношению к нашей комнате).

Теперь, если бы наш выбор системы отсчета и наши методы измерения не были произвольными, а были бы навязаны каким-то неизбежным образом структурой или природой пространства, мы все еще могли бы утверждать, что положение и движение, хотя и относительные по отношению к нашей системе отсчета, все же были бы абсолютными, поскольку их всегда можно было бы определить однозначно. Но эта неизбежность конкретной системы отсчета как раз и является тем, что аморфная природа математического пространства делает невозможным, поскольку в математическом пространстве нет ничего, что позволяло бы нам выделить какую-либо конкретную систему отсчета. Следовательно, невозможно представить себе абсолютное однозначное определение положения и движения. В конечном итоге мы должны прийти к выводу, что в математическом пространстве положение и движение, как и расстояние и форма, являются полностью относительными.

До сих пор мы рассматривали математическое пространство, а математическое пространство — это лишь абстракция от пространства опыта. Поэтому остается выяснить, применимы ли наши выводы без изменений, когда мы рассматриваем физическое пространство опыта. Здесь мы можем заявить, что в том, что касается абсолютного положения, в наших выводах ничего не изменится. Так, в повседневной жизни, когда мы говорим о возвращении в ту же точку в пространстве, мы на самом деле не имеем в виду ту же точку в *пустом пространстве*. Мы имеем в виду скорее ту же точку на поверхности Земли и не задумываемся о том, переместилась ли Земля в пространстве за это время. На самом деле нам было бы совершенно невозможно точно определить, какое расстояние прошла Земля. Даже если бы мы могли определить смещение Земли по ее орбите вокруг Солнца, дальнейшие изыскания были бы затруднены из-за нашего незнания скорости движения Солнца в пространстве. Мы могли бы даже измерить скорость Солнца по отношению к звездам, но и это не дало бы нам его скорости в пустом пространстве, поскольку мы по-прежнему оставались бы в полном неведении относительно скорости звезд в целом в пространстве. Таким образом, мы видим, что, когда мы говорим об одной и той же точке в физическом пространстве, мы всегда имеем в виду одно и то же относительное положение по отношению к какой-либо наблюдаемой системе отсчета. Совершенно не обязательно, чтобы эта система была материальной, и мы вполне можем представить ее как определяемую тремя перпендикулярными лучами света. Основное требование заключается в том, чтобы она была наблюдаемой, чтобы все люди согласились с тем, о какой системе отсчета они говорят.

Из-за важной роли, которую земная кора играет в нашей повседневной жизни, невозможность определить одну и ту же точку в разное время без помощи системы отсчета несколько затушевывается. Но необходимо освоить этот аспект неуловимости пространства, прежде чем приступить к изучению более сложных вопросов, поднимаемых общей теорией относительности ().

Однако, когда мы рассматриваем проблему движения, мы обнаруживаем, что в отличие от того, что имеет место в математическом пространстве, движение в физическом пространстве кажется абсолютным. Хотя с чисто визуальной точки зрения движение тела будет зависеть в основном от выбранной нами системы отсчета и будет меняться, когда мы перейдем от системы отсчета Земли к, скажем, Луне или Солнцу, тем не менее, благодаря возникновению динамических эффектов можно абсолютно точно определить, вращается тело или нет. Это связано с тем, что эти характерные динамические эффекты присутствуют одинаково независимо от нашего выбора системы отсчета. Именно благодаря этим эмпирически обнаруженным динамическим фактам Ньютон был вынужден признать абсолютное значение движения, а значит, и пространства. Из сказанного можно сделать вывод, что мы не можем легкомысленно распространять на физическое пространство опыта выводы, полученные из концептуального математического пространства.

Теперь мы подошли к последнему пункту. Предположим, что в математическом пространстве мы хотим измерить расстояние между двумя объектами, движущимися различными способами в нашей системе отсчета. Чтобы наши измерения имели какой-либо смысл, мы, конечно, должны указать, что положения двух объектов соответствуют одному и тому же моменту времени. Поэтому, если предположить, что изменение относительного движения нашей системы отсчета вызывает изменение в нашем понимании одинаковости времени в двух разных местах, расстояние между двумя объектами будет варьироваться в зависимости от системы отсчета, в которой мы его измеряем. Но здесь мы обсуждаем чисто математическое пространство, которое мы всегда можем представлять себе отдельно от

времени. Следовательно, мы можем предположить, что одинаковость времени в двух разных местах не зависит от каких-либо изменений в выборе нашей системы отсчета.

Классическая наука полагала, что пространство опыта также удовлетворяет этим условиям. Она считала, что время является абсолютным, что его скорость течения всегда одинакова и что понятие одинаковости времени в двух разных местах является абсолютным и однозначным. Это предположение было равносильно отделению пространства от времени и рассмотрению их как двух существенно разных категорий. Одним из триумфов теории относительности стало опровержение этой фундаментальной тезисы и доказательство того, что в реальном мире опыта пространственное континуум само по себе является лишь тенью. Отныне континуум реальности — это пространство-время, четырехмерный континуум событий, а не трехмерный континуум точек, соединенный с одномерным континуумом мгновений, как в классической науке. Но поскольку необходимость этих новых концепций будет подробно обоснована в следующих главах, мы воздержимся от их обсуждения на данном этапе.

ГЛАВА IV

ПРОБЛЕМА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

До сих пор мы обсуждали, в частности, ту абстракцию от пространства опыта, которую мы называли математическим пространством; мы видели, что оно является полностью аморфным. В настоящей главе мы должны рассмотреть пространство опыта и определить, в какой степени оно отличается от концептуального математического пространства. Важное различие в отношении проблемы движения уже было отмечено, поскольку мы помним, что в физическом пространстве движение часто проявляется как абсолютное. Однако на данный момент мы ограничимся проблемой конгруэнтности.

Математическое пространство аморфно; оно не имеет внутренних метрик, и наш выбор стандартов измерения в значительной степени произволен. В результате абсолютная форма, размер и прямолинейность являются бессмысленными понятиями. Но в физическом пространстве общеизвестно, что людям не составляет труда хотя бы приблизительно согласиться с одинаковостью двух форм или двух размеров. Они согласны с тем, что камень остается недеформированным при перемещении, и поэтому объявляют камень жестким, в то время как признают, что объект, ведящий себя как червь, относится к извивающимся.

Таким образом, здесь, по-видимому, существует важное различие между математическим пространством, где не предлагается никакого конкретного определения конгруэнтности, и физическим пространством, где определенный тип, по-видимому, навязывается естественным образом и принимается единодушно. В конце концов, в этом единодушном согласии нет ничего особо загадочного, ведь если бы люди отказались руководствоваться своим зрением при определении конгруэнтности, они столкнулись бы со всевозможными трудностями. Им пришлось бы предположить, что камень, который они несут в руках, хотя визуально и выглядит неизменным, все же извивается, и, наоборот, что тела, которые кажутся извивающимися, все же являются жесткими. Трудности в достижении общего понимания измерения были бы таким образом безнадежно велики. Фактически, упомянутое нами определение конгруэнтности навязывается настолько непреодолимо, что только после открытия неевклидовой геометрии его абсолютная достоверность была опровергнута.

Рассматривая ситуацию в ее нынешнем состоянии, мы можем сказать, что материальные стержни, визуально признанные жесткими, будут приниматься за нормы измерения в физическом пространстве. Другими словами, будет предполагаться, что стержни, которые совпадают при соединении, будут оставаться конгруэнтными при переносе, независимо друг от друга, в другие области пространства. Конечно, физик будет по возможности остерегаться локальных случайных влияний, таких как изменения давления и температуры, которые могут повлиять на поведение его стержней. Но когда все эти элементарные меры предосторожности будут соблюдены, геометрия, определяемая нашими стержнями, автоматически станет *геометрией пространства*. Это физическое определение конгруэнтности можно назвать *практической конгруэнтностью*, в отличие от *теоретической конгруэнтности*, которая воплощена в математических типах, которые мы обсуждали.

Имея стандартные твердые тела, определенные таким образом физическими объектами, физик может проводить измерения в пространстве своей системы отсчета и, как следствие,

получать числовые результаты трехмерной евклидовой геометрии. Поскольку чем тщательнее он защищается от таких случайных влияний, как колебания температуры, тем точнее его численные результаты приближаются к результатам чистой евклидовой геометрии, он считает оправданным утверждать, что жесткие объекты ведут себя как жесткие евклидовы тела и что пространство нашего опыта является строго евклидовым.

Мы также можем вспомнить, что после определения его жестких тел сразу же следует определение прямой линии как оси вращения вращающегося твердого тела, две точки которого являются фиксированными, или как кратчайшего расстояния между двумя точками в пространстве; и, конечно, прямая линия, определенная таким образом, удовлетворяет параллельному постулату Евклида, поскольку она выводится из поведения евклидовых твердых тел.

На этом этапе ряд популярных сторонников неевклидовой геометрии впали в довольно досадную ошибку. Они утверждали, что материальные тела в идеальных условиях должны обязательно вести себя как евклидовы тела, поскольку, если бы они вели себя как неевклидовы тела при смещении, они изгибались бы и меняли форму. Поскольку было бы недопустимо приписывать такое искажающее влияние той пустоте, которую мы называем пустым пространством, неевклидовость материальных тел была бы исключена на основании первых принципов. Но эти люди упускают из виду тот факт, что геометрии Римана и Лобачевского никоим образом не относятся к телам, которые изгибаются и искажаются в абсолютном смысле при движении. Неевклидовы тела просто искажаются по сравнению с евклидовыми телами, взятыми за стандарт; но было бы столь же верно утверждать, что евклидовы тела также изгибались бы при смещении, если бы мы сравнивали их с неевклидовыми телами, взятыми за стандарт. В любом случае, как евклидовы, так и неевклидовы тела ведут себя однородно во всем пространстве.⁽¹¹¹⁾ Под этим мы подразумеваем, что где бы они ни находились в пустом пространстве, измерения, вычисленные с их помощью, дадут одинаковые числовые результаты. Что касается евклидовой конгруэнтности и евклидовой жесткости, то они ни в коей мере не являются более репрезентативными для реальной жесткости, чем неевклидовы разновидности. Поэтому нет никаких оснований апеллировать к искажающему эффекту пустого пространства, чтобы объяснить возможное неевклидово поведение наших материальных твердых тел при перемещении из одной точки в другую. Неевклидовость может существовать или не существовать в реальном пространстве, но это вопрос физических измерений, а не философии или математики.

Все, что мы можем сказать, это то, что принцип достаточного основания заставляет нас считать пустое пространство одинаковым во всех отношениях, и что наши измерительные линейки и материальные тела также должны вести себя однородно и изотропно, как это и происходит в трех обсуждаемых геометриях. Только если измерения, проведенные с помощью наших линеек в разных частях пространства, дают переменные неоднородные числовые результаты, мы должны предположить, что пространство на самом деле не было пустым и что наши линейки подвергались локальным воздействиям.

В любом случае, ранние неевклидовы геометры, понимая, что в результате измерений пространство может оказаться неевклидовым, занялись разработкой способов окончательного решения этого вопроса. Теперь, в результате их измерений с помощью материальных стержней, не было сомнений в том, что пространство было очень приближенным к евклидовому. Но здесь необходимо понимать, что две неевклидовы геометрии, в отличие от евклидовой, не являются единственными. Мы можем представить

себе различные степени неевклидовости обоих типов, плавно переходящие в евклидову геометрию. Поэтому оставался открытым вопрос, не может ли пространство, несмотря на его явные евклидовы характеристики, иметь следы неевклидовости. Простая иллюстрация поможет прояснить этот момент.

Мы видели, что в евклидовой геометрии отношение длины окружности к ее диаметру всегда было одинаковым числом, π . В геометрии Римана это число всегда было меньше, чем π , и постепенно уменьшалось от значения π до нуля по мере увеличения диаметра окружности. Но в этой скорости уменьшения не было ничего определенного; она могла быть очень быстрой, так же как и чрезвычайно незначительной. Поэтому мы должны представлять себе как различные степени неевклидовости или отклонения от евклидовости. Следовательно, если неевклидовость реального пространства была бы чрезвычайно незначительной, то для ее обнаружения потребовались бы измерения, охватывающие гигантскую окружность, доходящую до звезд, а измерения, проведенные в ограниченных областях, не могли бы считаться окончательными. Единственным средством выявления незначительных следов неевклидовости было бы, таким образом, проведение измерений на космических расстояниях.

Конечно, в попытке такого рода измерения с помощью материальных стержней были исключены, и необходимо было прибегнуть к другим методам исследования. Они были получены за счет распространения лучей света в пустом пространстве. Утверждалось, что принцип достаточного основания исключает отклонение лучей света вправо или влево от их курса по самой прямой траектории через пустое пространство; это убеждение также согласовалось с важным физическим принципом наименьшего действия, выведенным из законов механики.^[12] Соответственно, лучи света должны были бы следовать геодезическим линиям в пустом пространстве; и, как мы видели, знание геодезических линий или прямых линий раскрывает столько же о геометрии пространства, сколько и сама конгруэнтность.

Гаусс, по-видимому, был первым, кто предпринял подобные исследования пространства, когда проводил эксперименты с лучами света, передаваемыми от одной вершины горы к другой. Но его наблюдения были слишком грубыми и проводились на слишком маленькой площади, чтобы обнаружить какие-либо следы неевклидовости. Лобачевский предложил проводить астрономические наблюдения за ходом лучей звездного света через межзвездное пространство. Например, если бы два луча света, исходящие от очень далекой звезды и попадающие на Землю в двух разных точках ее орбиты, казались сходящимися, мы бы знали, что пространство является римановым. Если бы два луча казались расходящимися из общей точки, пространство было бы лобачевским; и, наконец, если бы для очень далеких звезд эти два направления казались идентичными, пространство было бы действительно евклидовым. Однако самые точные астрономические измерения звездных параллаксов не выявили ни малейших следов неевклидовости. Поэтому было сделано предположение, что если в реальном пространстве и присутствуют следы неевклидовости, то они, без сомнения, чрезвычайно незначительны, так что для всех практических целей геометрия пространства может считаться евклидовой. Таковы были результаты физического исследования пространства.

Из всего этого мы видим, что физик, основывая свое исследование пространства на эмпирических методах, вполне обоснованно утверждает, что его геометрия может быть определена, что можно прийти к истинному определению конгруэнтности и что равенство двух длин и двух пространственных конфигураций имеет определенное значение в природе.

И все же, когда мы подвергаем все эти различные примеры критическому анализу, мы не можем не заметить, что это определение геометрии пространства является по сути физическим и, следовательно, зависит от поведения материальных объектов и лучей света. Если бы поведение материальных тел при смещении регулировалось другими физическими законами, если бы лучи света следовали по другим траекториям, геометрия, которую мы приписали бы пространству, могла бы быть совершенно иной. И мы вполне можем задаться вопросом, какое отношение поведение физических объектов имеет к геометрии пространства. Мы вернемся к этому аспекту проблемы позже.

Кроме того, иногда высказывается мнение, что наше восприятие формы и размера должно иметь гораздо более глубокое значение и не может быть объяснено лишь законами поведения материальных объектов и лучей света. Например, отмечается, что даже ребенок, ничего не знающий о измерениях, по простому визуальному осмотру судит, что монета (если смотреть на нее под прямым углом) круглая, а яйцо овальное. Он не считает необходимым проверять этот факт с помощью линейки. Однако, независимо от того, какие мнения мы в конечном итоге можем отстаивать по вопросу о геометрии, присущей физическому пространству, вряд ли можно считать, что этот последний аргумент критика в малейшей степени доказывает его точку зрения.

Может быть полезно рассмотреть эту иллюстрацию более подробно. Во-первых, мы должны понимать, что все, что мы можем оценить, просто глядя на объект, — это его изображение на нашей сетчатке. Действительно, если бы мы поместили микроскоп или деформирующую линзу между объектом и глазом, объект не претерпел бы никаких изменений, но его изображение, проецируемое на нашу сетчатку, конечно, изменилось бы. В результате наше суждение о его форме и размере изменилось бы. Следовательно, когда мы без колебаний решаем, что монета круглая, единственный вывод, который можно сделать, заключается в том, что изображение монеты на сетчатке оценивается мозгом (или разумом, или как мы решили это назвать) как круглое. Мы не хотим вторгаться в сферу деятельности офтальмолога или физиолога, которые лучше нас подготовлены для дальнейшего анализа, но мы можем указать, что проблема, которую мы сейчас рассматриваем, имеет совершенно иную природу, чем та, с которой мы начали. Там мы рассматривали, является ли форма в пустом пространстве абсолютной; здесь мы рассматриваем, должно ли изображение, проецируемое на нашу сетчатку, впечатлять наше восприятие какой-либо определенной формой.

Разница заключается именно в следующем: в математическом пространстве и даже в физическом пространстве абсолютное измерение, казалось, ускользало от нас, поскольку ввиду непрерывности пространства казалось невозможным приступить к перечислению точек. Но в случае с сетчаткой ее поверхность больше не является однородной; она обладает неоднородной структурой, как и все ткани, вероятно, дискретной, образующей узор. Во всех таких случаях определенная метрика предлагается сама собой, так же как на сетке, в отсутствие линейки, мы инстинктивно сравниваем длины, считая отверстия, разделяющие наши точки.

Является ли в случае с сетчаткой наше восприятие круглости монеты результатом какого-то бессознательного процесса подсчета — это вопрос, который должен решать специалист; но в любом случае, если мы считаем, что сетчатка и глаз являются евклидовыми телами, как и наши линейки, то согласованность между нашими вычислениями формы и размера, определяемыми палочками, и нашим непосредственным визуальным восприятием формы не представляется большой загадкой.

Но есть еще один момент, который следует учитывать. Если бы у нас было прямое интуитивное представление о конгруэнтности и абсолютной форме или длине, наши измерения с помощью палочек должны были бы быть скорректированы в соответствии с этой интуицией. Таким образом, введение палочек рассматривалось бы лишь как дополнение, позволяющее получить большую точность. Но так не происходит.

Наши интуитивные визуальные оценки дают результаты, которые отличаются от результатов, полученных с помощью линеек, и не просто *случайно*, в результате несовершенства человеческого наблюдения, а *систематически*.

Монета, которая по измерениям является круглой, будет казаться глазу сплюсненной.^[13] Это явление иллюстрируется хорошо известной оптической иллюзией, при которой две жесткие линейки, которые совпадают, когда их помещают рядом, кажутся разной величины, когда их помещают соответственно горизонтально и вертикально. Хорошо известно, что вертикальная линейка кажется длиннее горизонтальной. По этой причине вертикальные полосы на ткани делают человека, который ее носит, визуально стройнее и выше, тогда как горизонтальные полосы производят обратный эффект. Сам факт того, что мы согласились принять такие расхождения как следствие оптической иллюзии, а не недостоверности наших палочек, доказывает, что мы сознательно отвергаем наше интуитивное суждение о форме и размере в пользу более сложных правил измерения. Другими словами, мы отказались от прямой интуиции в пользу физических определений, а значит, в пользу удобных, но условных стандартов.

Короче говоря, мы можем утверждать, что не обладаем прямой интуицией формы и длины, а то небольшое, что у нас, по-видимому, есть, в конечном счете, объясняется свойствами материальных тел и лучей света.

Рассмотрим последний пример, связанный с расстоянием. Мы понимаем, не прибегая к измерениям, что расстояние через улицу меньше, чем вся длина улицы. Эта убежденность объясняется рядом различных причин. Во-первых, мышечные ощущения, сопровождающие сближение глаз и фокусировку изображений на сетчатке, сами по себе указывают на происхождение нашего восприятия расстояния. Кроме того, мы знаем по опыту, что для прохождения всей длины улицы требуется больше усилий и времени, чем для перехода с одного тротуара на другой. И если бы мы спросили, почему переход улицы занимает меньше времени, то обнаружили бы, что это связано с тем, что мы двигались определенными шагами.

Хотя в математическом пространстве эти два расстояния были бы равны или неравны в соответствии с нашими измерительными конвенциями, в практической жизни мы невольно установили нашу измерительную конвенцию, идя пешком. Наши последовательные шаги отныне определяют в нашей оценке равные расстояния; и в этих условиях расстояния становятся измеримыми в терминах этих шагов. Но эти шаги сами по себе контролируются нашим человеческим телом; следовательно, все, что мы сделали, — это измерили пространство с помощью наших ног. О том, что измерение возникло именно таким образом, ясно свидетельствуют такие слова, как «*фут*» и «*локоть*», или же определение ярда как расстояния между кончиком носа определенного короля и кончиками его пальцев. И именно потому, что наши человеческие конечности проявляют ту же конгруэнтность, что и материальные тела вокруг нас, этот тип измерения снова навязывается нам с такой силой. Действительно, измерения, вычисляемые с помощью человеческих конечностей, кажутся инстинктивными и иллюстрируются на примере детей, которые, повзрослев, с удивлением обнаруживают, что комнаты и здания, которых они не видели несколько лет, кажутся им

значительно меньше. Инстинктивно ребенок измеряет размеры с помощью своего собственного роста.

Таким образом, как бы мы ни рассматривали этот вопрос, в нашей естественной вере в абсолютность формы и размера или в определенную геометрию пространства, по-видимому, нет ничего загадочного. Ни один из приведенных до сих пор примеров не дает нам права утверждать, что физическое пространство проявляет определенную метрику и что конгруэнтность является чем-то иным, чем условным.

Если мы рассмотрим проблему в ее нынешнем состоянии, то увидим, что в конечном счете именно физическое поведение материальных тел и лучей света ответственно за нашу естественную веру в абсолютную форму. Но это осознание приносит с собой уверенность в том, что само пространство полностью ускользнуло от нас в наших дискуссиях. Такова была позиция Пуанкаре. Он утверждал, что, хотя для удобства было вполне естественно измерять пространство так, как мы это делаем, при необходимости мы могли бы полностью игнорировать поведение материальных тел, принять неевклидовы стандарты измерения и действовать как прежде.

Несмотря на это изменение, мы могли бы построить точно такие же инженерные сооружения, фактически переписать всю физику. Разумеется, все было бы чрезвычайно сложным, все известные нам законы были бы искажены, и пришлось бы вводить *специальные* гипотезы. Но, в конечном счете, эта задача была бы теоретически возможна; так что, если мы игнорируем критерии удобства и простоты, то между различными типами измерений нет никакой разницы, не больше, чем между метрической системой и британскими единицами измерения.

В качестве дальнейшей иллюстрации неуловимости абсолютной формы и размера Пуанкаре просит нас представить себе полый сферический объем, расположенный где-либо в пространстве, и предположить, что температура в сфере постепенно снижается от центра, достигая абсолютного нуля на поверхности. Он предполагает, что эта полая сфера населена воображаемыми существами, тела которых расширяются и сжимаются в зависимости от температуры, и что все материальные тела в сфере ведут себя аналогичным образом. Если мы дополним эти предположения допущением, что показатель преломления среды внутри сферы изменяется определенным образом, то лучи света в этом гипотетическом мире будут описывать круги.

Эта замкнутая вселенная, конечно, казалась бы бесконечной ее обитателям, поскольку по мере продвижения от центра к поверхности их тела становились бы меньше, а шаги короче, так что им было бы невозможно достичь ее границы, как бы долго они ни шли. Геометры этого воображаемого мира сочли бы оправданным поступать точно так же, как поступали мы сами. Они определили бы как остающиеся конгруэнтными при смещении, а значит, как жесткие, те тела, которые, по их мнению, оставались бы неизменными, куда бы они их ни переносили. Благодаря траекториям, вычисленным для лучей света, и одинаковости уменьшения размеров всех объектов по мере удаления от центра, расширяющиеся и сжимающиеся тела этой вселенной обладали бы всеми характеристиками жесткости. При проведении измерений с помощью своих жестких стержней гипотетические существа получали бы неевклидовы результаты, весь их мир казался бы им неевклидовым, и неевклидова геометрия была бы для них столь же неизбежна, как евклидова геометрия для обычного непрофессионала. Среди гипотетических существ наверняка появился бы какой-нибудь Кант, который объяснил бы, что неевклидово пространство является *априорной* формой чистой чувствительности, превосходящей разум и опыт. Затем, в конце концов, появился бы какой-нибудь великий математик, смел бы все эти паутины и доказал бы, что

существуют и другие совершенно последовательные типы геометрии и что укоренившееся предпочтение его сограждан к неевклидовой геометрии обусловлено диктатом общего опыта и ни в коем случае не является *априорной* формой чистой чувствительности.

Иллюстрация Пуанкаре интересна не только с философской точки зрения. Главный момент заключается в следующем: гипотетические существа имели бы такое же право утверждать, что пространство является неевклидовым, как и мы утверждаем, что оно евклидово. Конечно, если бы мы могли заглянуть в их мир, мы бы сказали, что они неправильно понимают понятие измерения и совершенно ошибаются, полагая, что их тела являются жесткими, поскольку мы видели бы, как они становятся все меньше и меньше по мере приближения к поверхности. Но мы не должны забывать, что воображаемые существа, в свою очередь, если бы они могли видеть наши евклидовы тела, ответили бы нам тем же и обвинили бы нас в неправильном понимании понятий жесткости и измерения.

Из всего этого следует, что при простом изменении физических условий одно и то же пространство будет считаться неевклидовым или евклидовым. Очевидно, что из-за этого противоречия само пространство не может иметь никакого отношения к этой проблеме; тип пространства, который обсуждают физики, сводится, таким образом, к реляционному синтезу физических результатов. Само пространство остается аморфным.

Пуанкаре развивает аналогичные аргументы, когда обсуждает наблюдения параллакса, проводимые на лучах звездного света. Евклидова геометрия, например, рассматриваемая чисто как система измерений, с математической точки зрения является простейшим типом геометрии по той же причине, по которой односложное слово проще многосложного. Поэтому, очевидно, в наших интересах сохранить ее, если это возможно. Конечно, если бы, как в гипотетическом мире, обсуждавшемся ранее, материальные тела вели себя как неевклидовы твердые тела, а лучи света следовали соответствующим траекториям, нам пришлось бы отказаться от евклидовой геометрии из соображений практической целесообразности. Но поскольку в мире, в котором мы живем, привычные нам твердые тела ведут себя с высокой степенью приближения так же, как евклидовы твердые тела, наше предпочтение евклидовой геометрии кажется вполне оправданным даже с точки зрения физики.

Предположим теперь, что параллаксы очень удаленных звезд оказались отрицательными: пришлось бы отказаться от евклидовой геометрии и евклидова пространства? Как указывает Пуанкаре, это ни в коем случае не было бы необходимо или даже целесообразно. Верно, что если бы мы предположили, как это принято, что лучи звездного света следуют геодезическим линиям в пространстве, отрицательные параллаксы означали бы следы римановского подхода в пространстве; но главный вопрос, который необходимо решить, заключается в том: «Откуда мы знаем, что лучи света следуют геодезическим линиям?» Очевидно, что это невозможно ни доказать, ни опровергнуть. Эмпирическое доказательство правильности или неправильности такого утверждения было бы возможно только в том случае, если бы мы заранее знали, как расположены геодезические линии в пространстве, потому что тогда мы могли бы определить путем наблюдения, следуют ли за ними лучи света или нет. Но как мы могли бы установить расположение геодезических линий, если мы еще не знаем эту геометрию, которую теперь предлагаем определить? Очевидно, что наш подход был бы циклическим. Можем ли мы хотя бы предположить, что лучи света неизбежно следуют геодезическим линиям? Возможно ли какое-либо другое предположение? Конечно, нет. Отрицание этого предположения изменило бы наше понимание оптических явлений, но что с того? Мы всегда могли бы выйти из затруднительного положения, изменив законы оптической передачи, и при этом сохранить евклидову геометрию. Другими словами, геометрия, которую физик-ист

приписывает пространству, зависит от его принятия ряда физических законов; и, изменяя эти законы соответствующим образом, он все равно мог бы объяснить наблюдаемые факты и приписать пространству соответствующие типы геометрии. Поскольку все эти различные системы физических законов объясняют факты опыта, как мы можем надеяться решить, какая из этих систем соответствует реальности? И в таких условиях, какой смысл обсуждать реальную геометрию пространства? Все, что мы можем обсуждать, — это целесообразность.

Другими словами, Пуанкаре, отделяя пространство от его материального содержания, геометрию от физики, ставит пространство и его геометрию вне контроля эксперимента, так что физику действительно не о чем спорить.

На самом деле, весь конфликт скорее кажущийся, чем реальный; он сосредоточен вокруг значения, которое мы хотим придать слову «реальность», независимо от того, понимаем ли мы реальность в прагматическом научном смысле или в метафизическом смысле как воплощение «истинного бытия». Для теоретического физика «реальность» означает ту гипотезу, которая позволит ему с максимальной простотой скоординировать природные явления. Он не знает других критериев реальности и, вероятно, проявит очень мало интереса к недостижимой реальности метафизика. Следовательно, если координация фактов опыта представляет большую простоту, когда он предполагает, что пространство является евклидовым или неевклидовым, то пространство является евклидовым или неевклидовым, несмотря на то, что явления могли бы быть скоординированы (хотя и менее простым способом), если бы была выбрана какая-то другая гипотеза.

Риманн выражает избирательную роль критерия простоты, когда пишет:

«Тем не менее, остается возможным, что отношения измерения пространства в бесконечно малом не соответствуют предположениям нашей геометрии [евклидовой геометрии], и, фактически, мы должны были бы предположить, что они не соответствуют, если бы это позволило нам объяснить явления более простым способом».^[14]

Это что касается научного понимания этого слова. Но если, с другой стороны, обсуждая «реальность», мы имеем в виду реальность метафизиков, как это происходит в случае с Пуанкаре, то кажется совершенно невозможным оспаривать его позицию; по крайней мере, вряд ли кто-либо из ученых захочет это делать. Ведь даже если предположить, что такая вещь, как метафизическая реальность, имеет какой-то смысл, почему она должна быть связана с простотой координации? В любом случае, сам Эйнштейн, вся теория которого сосредоточена вокруг определенной геометрии, приписываемой пространственно-временному фону, пишет: «*Sub specie æternitatis*, Пуанкаре, по моему мнению, прав».

Если и можно высказать какую-либо критику в адрес позиции Пуанкаре, то она должна быть основана на том, что он проявил себя плохим пророком, когда утверждал, что всегда будет проще сохранить евклидову геометрию. Эйнштейн доказал обратное. В любом случае, в дальнейшем мы будем заниматься исключительно реальным пространством физика, то есть пространством, к которому он приходит, когда стремится скоординировать явления с максимальной простотой. С таким пониманием пространства в наших умах первая причина для отвержения концепции аморфного пространства возникает, когда мы обнаруживаем, что большое количество различных методов исследования указывают на одну и ту же определенную метрику пространства. Таким образом, различные материальные тела, с которыми мы сталкиваемся, ни в коем случае не являются идентичными по своей природе; некоторые из них легкие, другие тяжелые, и их химический и молекулярный состав, безусловно, не одинаков. И все же в каждом случае, будь то деревянные, каменные или

стальные стержни, мы получаем одинаковые евклидовы результаты, при условии что мы работаем, насколько это возможно, в одинаковых условиях температуры и давления. Другими словами, наши определения конгруэнтности кажутся одинаковыми, независимо от материальных тел, к которым мы обращаемся.

Эта уникальность геометрии пространства еще более наглядно иллюстрируется следующим примером: здесь представлены два совершенно разных метода исследования пространства, один с использованием материальных стержней, дающих нам физическое определение конгруэнтности, а другой с использованием триангуляции световых лучей, дающих нам физическое определение геодезических линий. В обоих случаях мы приходим к одной и той же евклидовой геометрии, и это совпадение кажется довольно странным, поскольку мы могли бы ожидать, что если бы геометрия, которую мы приписываем пространству, не имела отношения к пространству, то тип полученной геометрии варьировался бы в зависимости от рассматриваемого метода физического исследования. Кроме того, если бы пространство было аморфным и, следовательно, не имело геодезических линий, было бы немыслимо, чтобы свободное тело или световой импульс знали, как и куда двигаться. Сама определенность и евклидова прямолинейность траекторий свободных тел и световых лучей, когда они относятся к определенной системе отсчета, кажутся указанием на то, что пространство имеет структуру и не является аморфным.

Конечно, с учетом современных открытий нет ничего странного в том, что траектории свободных тел совпадают с траекториями световых волн, поскольку доказано, что свет обладает импульсом, как и материя. Но даже в этом случае кажется странным, что траектории, определяемые движущимися телами, дают ту же геометрию, что и измерения, проводимые с неподвижными телами.

С другой стороны, существуют динамические свойства пространства, которые мы не можем игнорировать. Если бы физическое пространство было аморфным, все пути через пространство должны были бы быть эквивалентными, однако центробежная сила и силы инерции проявляются для определенных путей и движений, а для других — нет. Откуда могли бы возникнуть эти силы, если не из структуры самого пространства? Таково было утверждение Ньютона.

Учитывая все эти явления, которые трудно объяснить, если верить в аморфную природу пространства, если только не прибегнуть к какой-то чудесной заранее установленной гармонии, кажется, что пространству следует приписать определенную структуру или метрику, которая, в свете эксперимента, оказывается евклидовой, по крайней мере, в первом приближении. Иными словами, реальное пространство, по-видимому, пронизывается невидимым полем, **метрическим полем**, наделяющим его метрикой или структурой.

Теперь, учитывая тот факт, что математические требования той пустоты, которую мы называем пустым пространством, исключают наличие в ней метрического поля (*т. е. структуры или метрики как таковой*), самый простой выход из этой затруднительной ситуации — предположить, что реальное пространство не является действительно пустым, а заполнено какой-то таинственной физической средой, которую мы можем назвать «эфиром»^[15] и что именно эта физическая среда, а не само пространство, обладает евклидовой структурой. Отныне именно эта структура эфира будет отвечать за видимую метрику или метрическое поле пространства, которое заставляет материальные тела принимать определенные формы и регулирует траектории лучей света и свободных тел, удаленных от материи.

Однако для физика этот эфир будет неотделим от реального пространства; так что, по сути, когда физик обсуждает реальное пространство, он будет иметь в виду пространство вместе с его эфирным содержанием. Если бы эта эфирная структура исчезла, пространство стало бы аморфным, тела не знали бы, какую форму принять, а лучи света не знали бы, куда и как двигаться.

На этом этапе мы должны упомянуть предчувствия Римана по поводу метрического поля реального пространства. Риман не приписывал эту структуру пространства наличию какой-то невидимой среды, эфира, обладающего собственной структурой. По его мнению, происхождение метрического поля следует искать в другом месте. Он считал, что метрическое поле пространства следует сравнивать с магнитным или электрическим полем, пронизывающим пространство. И так же, как магнитное поле существует в пространстве, окружающем магнит, Риман искал физическую причину метрического поля. С характерной для него смелостью он нашел ее в материи Вселенной; таким образом, метрическое поле стало разновидностью материального поля. Если принять идеи Римана, то можно понять, как перераспределение звездной материи во Вселенной, изменяя расположение метрического поля, приводит к деформации формы данного тела и изменениям в траекториях лучей света. Как говорит Вейль, сферический шарик из глины, спрессованный в любую другую форму, может снова приобрести сферическую форму, если вся материя во Вселенной будет перераспределена соответствующим образом.

Из этого также следует, что если бы вся материя во Вселенной была уничтожена и в результате исчезло метрическое поле, пространство (при условии, что этот термин сохранил бы какое-либо физическое значение) стало бы полностью аморфным, как математическое пространство; лучи света не знали бы, куда двигаться, поскольку исчезли бы все геодезические линии; и если бы в пустое пространство было введено единственное материальное тело, оно не знало бы, какую форму принять. Без метрического поля физическое пространство было бы невысказано.

Из этой гипотезы Римана о формировании материи () вытекают еще более важные последствия. До появления этих взглядов принцип достаточного основания, казалось, подразумевал, что физическое пространство всегда будет однородным — одинаковым во всех точках. Это не обязательно означает евклидово, поскольку, как мы знаем, геометрии Римана и Лобачевского также соответствуют однородным пространствам; но все степени неевклидовости, варьирующиеся от места к месту, считались *априори* исключенными. Из обширного ряда возможных типов геометрий или пространств, открытых Риманом, выжили только однородные типы; ситуация, которую Вейль считает уместно выраженной классической фразой: «*Parturiunt montes, nascetur ridiculus mus*» (Рождают горы, рождается смешная мышь).

Но с новыми взглядами, отстаиваемыми Риманом, ситуация полностью меняется; теперь текстура, структура или геометрия пространства определяются метрическим полем, которое само по себе создается распределением материи. Любое неоднородное распределение материи будет тогда влечь за собой переменную структуру или геометрию пространства от места к месту.

Теперь возникает вопрос: какова природа этого метрического поля? Является ли оно просто названием, которое мы даем структуре пространства, вызванной материей? Такая точка зрения кажется невозможной, поскольку пространство само по себе, будучи простой пустотой, не поддается структурированию. Является ли метрическое поле прямым излучением материи, разреженной формой материи? Или же это реальность категории, отличной от материи (назовем ее эфиром), которая в отсутствие материи была бы

аморфной и которая могла бы быть принудительно приведена в структуру только под воздействием материи и передаваться от места к месту через эфирную субстанцию? В этом случае мы снова должны прийти к мнению, что то, что мы обычно называем структурой или геометрией реального пространства, сводится к структуре пространства, заполненного эфиром, сформированным материей.

Чрезвычайно спекулятивные идеи Римана по поводу метрического поля были практически проигнорированы в его время, за исключением английского математика Клиффорда, который перевел работы Римана, предваряя их своим собственным открытием неевклидова пространства Клиффорда. Клиффорд осознал потенциальную важность новых идей и предположил, что сама материя может быть объяснена с точки зрения этих локальных вариаций неевклидовости пространства, тем самым в определенном смысле переворачивая идеи Римана. Но в дни Клиффорда это убеждение было математически несостоятельным. Более того, физическое исследование пространства, даже внутри жидкостей, казалось, приводило к неизменной евклидовости. И здесь следует отметить замечательную иронию всей ситуации. Хотя экспериментаторы использовали самые совершенные приборы для обнаружения возможного неевклидова пространства и потерпели неудачу в своих усилиях, именно теоретическому исследователю Эйнштейну, благодаря огромным усилиям рационального мышления, основанным на нескольких слабых эмпирических уликах, удалось разгадать эту загадку и привести идеи Римана к победе.^[16] Надежды Клиффорда также не были обмануты, поскольку изменяющаяся неевклидовость континуума должна была раскрыть таинственный секрет гравитации, а возможно, также материи, движения и электричества.

Однако перед тем, как решить эту проблему, Эйнштейн пришел к выводу, что пространство само по себе не является фундаментальным. Фундаментальным континуумом, неевклидовость которого предстояло исследовать, было не пространство, а пространство-время, четырехмерное объединение пространства и времени, обладающее четырехмерным метрическим полем, управляемым распределением материи. Соответственно, Эйнштейн применил идеи Римана к пространству-времени, а не к пространству, и попытался исследовать геометрию пространства-времени путем чисто рациональной координации известных эмпирических фактов. Он обнаружил, что в тот момент, когда мы заменяем пространство пространством-временем (*и не наоборот*) и предполагаем, что свободные тела и лучи света следуют геодезическим линиям *не в пространстве, а в пространстве-времени*, долгожданные локальные вариации в геометрии становятся очевидными. Они находятся повсюду вокруг нас, в непосредственной близости, и все же мы никогда не осознавали этого. Мы называли их эффекты гравитационными, приписывая их силам, чуждым геометрии протяженности, и никогда не подозревая, что они были результатом тех самых локальных вариаций в геометрии, поиски которых были тщетными, несмотря на то, что мы расширили наши наблюдения до глубин Вселенной. Действительно, можно сказать, что теория относительности является теорией метрического поля пространства-времени.

Пока мы затронули эту тему, можно упомянуть, что это загадочное метрическое поле, которое формирует как пространство, так и время, по-видимому, полностью обусловлено материей Вселенной. По крайней мере, таковы выводы, которые можно сделать из существования цилиндрической Вселенной Эйнштейна. Однако проблема по-прежнему остается чрезвычайно неясной. По-прежнему можно верить Эддингтону и де Ситтеру, что метрическое поле или пространственно-временная эфирная структура могут существовать в отсутствие материи, вопреки взглядам Римана.

Наконец, давайте рассмотрим, как эти новые взгляды повлияют на проблему абсолютной формы и размера. Мы можем сказать, что пространство-время обладает определенной геометрией, но эта геометрия подвержена локальным изменениям как в пространстве, так и во времени, поскольку массы Вселенной изменяют свои положения. Однако, как мы уже неоднократно упоминали, геометрия, даже если она полностью определена и неизменна, не подразумевает абсолютной формы и размера. Она лишь регулирует отношения или определяет законы взаимного расположения тел, и эти законы могут оставаться неизменными, даже если абсолютная форма и размер тел изменяются. Ограничиваясь проблемой абсолютного размера, мы обнаружим, что в конечной вселенной метрическое поле дает универсальный стандарт длины, задаваемый радиусом конечной вселенной. В отношении этой естественной шкалы объект представляет собой определенный размер, но, очевидно, в самой шкале нет ничего абсолютного. Не только ее величина будет определяться общим количеством материи во вселенной, количеством, предположительно определяемым случайно, но, кроме того, не будет никаких средств определить величину этой шкалы, кроме как приняв какую-то другую шкалу, и так *до бесконечности*.

ГЛАВА V

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА НЕЕВКЛИДОВЫ ГЕОМЕТРИИ

Тип геометрии, который мы получаем, зависит, как мы знаем, от нашего определения конгруэнтности. Если мы определяем как конгруэнтные смещения тех тел, которые в обычной жизни мы считаем жесткими и недеформируемыми, мы получаем евклидову геометрию. Если же мы определяем как конгруэнтные смещения тех тел, которые в обычной жизни мы считаем изменяемыми по форме, мы обычно получаем неевклидову геометрию.

Чтобы упростить дальнейшее изложение, сначала рассмотрим частный случай двумерной геометрии. Рассмотрим плоскую поверхность. Если на этой плоской поверхности мы проводим измерения с помощью евклидовых линеек, мы получаем евклидовые результаты; если мы используем линейки, которые, согласно евклидовой точке зрения, при смещении изгибаются соответствующим образом, мы получаем геометрию Римана или Лобачевского, в зависимости от случая. Следует отметить, что плоскость во всех трех случаях одна и та же, но геометрия, которую мы получаем на ее поверхности, может быть евклидовой или неевклидовой. Изменились не сама плоскость, а наши методы измерения на ней.

Теперь можно упомянуть, что существует ряд альтернативных способов представления как евклидовой, так и неевклидовой геометрии. Какой из них предпочтительнее, во многом зависит от объема наших исследований. Один из этих альтернативных методов часто упоминается в популярных трудах (в частности, у Гельмгольца), поскольку он позволяет нам визуализировать последовательность соответствующих теорем, не отказываясь при этом от привычных евклидовых представлений.

Таким образом, в качестве отправной точки берется трехмерное евклидово пространство. Затем предлагается показать, как в этом трехмерном евклидовом пространстве может возникнуть двумерная неевклидова геометрия. Поскольку фундаментальное пространство, которое мы здесь постулируем, является евклидовым,

расстояния в этом пространстве должны вычисляться с помощью жестких евклидовых стержней. Затем показывается, что если мы приложим крошечные евклидовые стержни к поверхности сферы и проведем измерения на этой поверхности, то получим ряд числовых результатов, которые являются представительными для геометрии Римана. Главное преимущество этого метода представления заключается в том, что он позволяет нам с первого взгляда предвидеть, что геометрия Римана должна быть согласованной,^[17] поскольку в данном случае она сводится к евклидовой геометрии на сфере, которая является частным случаем евклидовой геометрии в трехмерном пространстве; а евклидова геометрия, как известно, согласованна. Но, помимо этого преимущества, эту процедуру следует избегать, поскольку она имеет тенденцию затушевывать философскую важность неевклидовой геометрии.

Во-первых, не всегда возможно следовать этому методу. Рассмотрим, например, случай геометрии Лобачевского. Так же как геометрия Римана была геометрией сферической поверхности, геометрия Лобачевского оказывается геометрией своеобразной седлообразной поверхности, называемой псевдосферой, как доказал Бельтрами. Однако Гильберт показал, что не может существовать поверхности, свободной от особенных точек, которая представляла бы полное распространение плоской геометрии Лобачевского; отсюда следует первая причина, по которой мы должны быть начеку в отношении ряда неожиданных трудностей.

Но это еще не все. Если мы примем метод представления двумерной неевклидовой геометрии как геометрии, полученной путем евклидовых измерений на кривой поверхности, то как нам представить трехмерную риманову геометрию? Очевидно, что мы должны начать с четырехмерного евклидова пространства, в которое встроена трехмерная сферическая поверхность. Но поскольку четырехмерное евклидово пространство выходит за пределы нашего непосредственного опыта и носит характер математической фикции, мы можем прийти к ошибочному выводу, что трехмерная неевклидова геометрия также должна быть чисто концептуальной конструкцией, не имеющей ничего общего с измерениями, которые могут быть проведены с помощью материальных стержней.

Мы столкнемся с еще большими трудностями, если захотим представить трехмерное неевклидово пространство, обладающее различными степенями неевклидовости в разных местах. Рассуждая по аналогии, мы были бы склонны сказать, что, так же как нерегулярно изогнутая поверхность, встроенная в трехмерное евклидово пространство, дает двумерную геометрию с различной степенью неевклидовости, так и теперь все, что нам нужно сделать, это представить себе нерегулярно изогнутую трехмерную поверхность, встроенную в четырехмерное евклидово пространство. Но эта аналогия была бы обманчивой, поскольку расчеты показывают, что невозможно представить произвольно изогнутую трехмерную поверхность в четырехмерном евклидовом пространстве. В общем случае нам пришлось бы поместить нашу разнообразно изгибающуюся трехмерную поверхность в шестимерное евклидово пространство. Точно так же четырехмерное неевклидово пространство переменной кривизны можно было бы представить только в десятимерном евклидовом пространстве, и так далее.^[18]

Теперь, учитывая эти трудности, учитывая тот факт, что для представления неевклидова пространства трех измерений в терминах евклидова пространства мы можем быть вынуждены обратиться к шестимерному евклидовому пространству, безусловно, чрезмерно возвышать евклидово пространство, рассматривая его как *Пространство*. Это особенно очевидно, если вспомнить, что мы могли бы представить себе наше трехмерное неевклидово пространство непосредственно, в результате измерений с помощью

изгибающихся стержней, без какой-либо ссылки на евклидову геометрию и без необходимости введения большего числа измерений.

На этом этапе новичок часто склонен *argument as follows*: «Вы говорите, что неевклидова геометрия двух измерений — это геометрия, полученная путем выполнения евклидовых измерений на подходящей кривой поверхности. Но ваше понятие кривизны не имеет смысла, если мы не противопоставляем его какому-то ранее существующему стандарту прямолинейности. Не доказывает ли, таким образом, ваша презентация, что евклидово пространство как представитель плоскости или прямолинейности логически предшествует неевклидовому пространству, которое подразумевает кривизну?»

Этот аргумент является радикально неверным и возникает из слишком поверхностного понимания неевклидовой геометрии. Во-первых, предположение, что понятие кривизны предполагает понятие прямолинейности, не более неизбежно, чем предположение, что понятие прямолинейности предполагает понятие кривизны. Ведь если верно утверждение, что изогнутое — это то, что не является прямым, то столь же верно утверждение, что прямое — это то, что не является изогнутым; таким образом, в отсутствие кривизны прямолинейность, в свою очередь, теряет смысл. Вопрос о том, что является более фундаментальным — круг или прямая линия, — является строго субъективным. Греки считали круговое движение самым благородным из всех движений; а разница между понятиями «самый благородный» и «самый фундаментальный» чрезвычайно незначительна. И это еще не все, потому что до сих пор мы рассуждали так, как будто евклидово пространство действительно плоское, а неевклидово пространство действительно кривое. Но мы должны помнить, что эта кривизна, о которой мы говорим, не должна толковаться как нечто абсолютное; она возникает исключительно из-за особого типа представления, который мы согласились выбрать.

Таким образом, в представлении неевклидовой геометрии, которое мы только что обсуждали, мы исходили из трехмерного евклидова пространства как основы и рассматривали кривые поверхности, встроенные в это пространство. Эта форма представления, как мы знаем, была эквивалентна утверждению, что на кривой поверхности должны соблюдаться евклидовы измерения. Но мы могли бы поступить иначе. Мы могли бы начать с трехмерного неевклидова пространства и рассмотреть геометрию криволинейных поверхностей (например, сферы), вложенных в это пространство. Это было бы эквивалентно применению неевклидовых стержней на нашей криволинейной поверхности.

При подходящих условиях геометрия нашей кривой поверхности (или сферы) стала бы тогда евклидовой. Таким образом, евклидовость сама по себе была бы связана с кривизной, а неевклидовость, которая в данном случае была бы типом геометрии, полученной на плоскости, вложенной в наше трехмерное неевклидово пространство, соответственно была бы связана с плоскостью. Короче говоря, мы не должны позволять слову «кривизна» вводить нас в заблуждение и формировать ложное представление о неевклидовой геометрии. Во многих отношениях выбор Риманом слова «кривизна» оказался неудачным, и следует придерживаться более научного термина «неевклидовость» ().^[19]

Есть еще один момент, о котором мы должны упомянуть. Можно утверждать, что в геометрии Римана двух измерений, то есть в геометрии сферической поверхности при соблюдении евклидовых измерений, прямая линия на сфере, являющаяся большим кругом, образует замкнутую кривую, тогда как в евклидовой геометрии прямая линия никогда не может образовывать замкнутую кривую. Однако в данном случае возникающая трудность связана не столько с евклидовизмом и неевклидовизмом, сколько с другой отраслью

геометрии, аналитической геометрией, о которой мы кратко упомянем в примечании в конце главы. Дело в том, что геометрия цилиндра, встроеного в евклидово пространство, является евклидовой в той же степени, что и геометрия плоскости, и все же на цилиндре некоторые прямые линии, а именно кольца, окружающие цилиндр, образуют замкнутые кривые.

Можно возразить, что эти кольца не являются евклидовыми прямыми линиями. Но в этом случае критик путает геометрию и размерность. С точки зрения двумерной евклидовой геометрии кольца на цилиндре являются совершенно прямыми линиями, и плоскому существу, движущемуся по цилиндрической поверхности, никогда не придет в голову рассматривать их в каком-либо ином свете. Только когда мы представляем поверхность цилиндра в трехмерном евклидовом пространстве, мы должны рассматривать кольца как кривые. Короче говоря, линии, которые были бы прямыми в двух измерениях, могут быть кривыми, если смотреть на них с точки зрения более высокой размерности. По аналогии, линии, которые считались бы прямыми в трехмерном пространстве, могут быть признаны кривыми, если мы обратимся к четвертому измерению. Таким образом, какой бы способ мы ни выбрали для исследования понятия прямолинейности, мы обнаруживаем, что оно все больше и больше ускользает от нас.

По-видимому, нет необходимости далее останавливаться на этих довольно специфических проблемах, поскольку они заведут нас слишком далеко.

Наконец, есть еще одна причина, которую мы уже слегка затронули, и которая заставляет нас с большой осторожностью относиться к ошибочным аналогиям. Например, когда мы рассматриваем двумерную геометрию сферической поверхности, встроеной в трехмерное евклидово пространство, мы понимаем, что поверхность делит пространство на внешнюю и внутреннюю части. Тогда мы были бы склонны утверждать, что трехмерное риманово или сферическое пространство также должно делить четырехмерное пространство на внутреннюю и внешнюю части.

В данном случае такой ход мыслей был бы правильным, но важно отметить, что это представление о внутренней и внешней частях ни в коей мере не является существенным для неевклидовой геометрии. Если бы мы использовали более рациональный метод представления трехмерного не-евклидова пространства как результата особенного поведения наших измерительных линеек, представление о внутренней и внешней частях было бы бессмысленным. Мы должны понимать, что это понятие возникло лишь в результате нашего конкретного выбора способа представления и ни в коем случае не является внутренне необходимым условием.

Если эти довольно тонкие моменты были поняты, то нет ничего плохого в том, чтобы обсуждать неевклидовы геометрии как геометрии, полученные путем применения евклидовых линеек к криволинейным поверхностям. Во многих отношениях этот метод представления действительно полезен, поскольку, привыкнув в повседневной жизни производить измерения с помощью евклидовых линеек, мы можем легче визуализировать ряд абстрактных исследований, когда следует этой привычной процедуре.

Теперь перейдем к более тщательному изучению предыдущего метода. Мы сказали, что неевклидовы результаты получаются, когда мы ограничиваемся евклидовыми линейками при проведении измерений на кривых поверхностях. В случае римановой геометрии двух измерений требуемая поверхность — это поверхность сферы, встроеной в трехмерное евклидово пространство. В случае геометрии Лобачевского это поверхность в форме седла, известная как псевдосфера (с учетом упомянутых ранее ограничений).

Пока что мы ограничимся изучением геометрии Римана. Такое изучение в двух измерениях позволяет легко визуализировать, поскольку Земля имеет сферическую форму, и именно этот тип геометрии мы получаем, когда проводим измерения на ее поверхности с помощью жестких евклидовых измерительных линеек (предполагая, что поверхность идеально гладкая, как поверхность океана в спокойный день). Фактически, мы увидим, что постулаты геометрии Римана сразу же подтверждаются на сфере.

Начнем с того, что кратчайшее расстояние, или, лучше сказать, самое прямое расстояние между двумя точками на поверхности Земли, когда в качестве средства измерения используются евклидовы жесткие линейки или нерастяжимые рулетки, представляет собой дугу большого круга. Большие круги, такие как меридианы на поверхности нашей планеты, составляют, таким образом, прямые линии или геодезические линии геометрии Римана; и при обсуждении геометрии Римана мы можем называть их прямыми линиями.

Рассмотрим одну такую прямую линию или геодезическую линию, пусть это будет тот большой круг, который мы называем экватором. Согласно аксиомам геометрии Евклида, две перпендикулярные линии, проведенные в двух разных точках одной прямой линии, никогда не могут пересекаться; они лежат параллельно друг другу. С другой стороны, на сфере две перпендикулярные линии к экватору — это два меридиана, и эти меридианы всегда пересекаются на полюсе. Фактически невозможно провести на сфере две большие окружности, которые не пересекаются. Отсюда мы видим, что в геометрии Римана не может существовать параллельных геодезических линий. Аналогично, в то время как в геометрии Евклида сумма трех углов треугольника равна двум прямым углам, в геометрии Римана эта сумма всегда больше двух прямых углов. Это можно легко проверить, натянув веревки между тремя удаленными точками на поверхности Земли, чтобы образовать треугольник, а затем сложив значения углов в трех углах нашего треугольника.

Аналогичная проверка будет иметь место, если мы проведем измерения по окружности и ее диаметру. Таким образом, если в центральной точке на поверхности Земли мы закрепим один конец веревки, а другой конец будем вращать вокруг центральной точки, то он опишет круг на поверхности Земли. Затем, измерив длину окружности, обозначенной концом веревки, мы обнаружим, что отношение длины этой окружности к длине диаметра является *переменной* величиной, всегда меньшей, чем π , и зависящей от площади, занимаемой нашим кругом; тогда как в евклидовой геометрии это отношение было бы постоянной величиной π .

Есть еще один важный результат, о котором необходимо упомянуть. На плоскости, чем дальше мы блуждаем по прямой линии, тем дальше мы удаляемся от нашей начальной точки, тогда как на нашей сфере мы видим, что, следуя по прямой линии или геодезической линии, мы в конце концов вернемся к нашей начальной точке, обогнув Землю. Мы выражаем этот факт, говоря, что в геометрии Римана пространство конечно, но безгранично. Оно конечно, поскольку мы не можем бесконечно удаляться от нашей начальной точки; оно безгранично, потому что, как бы далеко мы ни ушли, мы никогда не наткнемся на каменную стену или пропасть, за которой мы не можем пройти дальше. С другой стороны, евклидово пространство, такое как плоская поверхность, *бесконечно* и безгранично.

А теперь предположим, что Земля, на которой мы проводили наши измерения, начала бесконечно раздуваться. Все характеристики геометрии Римана, которые мы обсуждали, постепенно исчезли бы, если бы мы ограничили наши измерения той же ограниченной областью поверхности. Конечно, наши измерения по-прежнему давали бы римановы результаты, поскольку, как бы ни увеличилась наша Земля, она все равно оставалась бы

сферической. Но результаты наших измерений на определенной области все больше приближали бы риманово пространство () к результатам евклидовой геометрии. Причина очевидна: чем больше объем сферы, тем больше данная область ее поверхности приближается к обычной плоскости.

Фактически плоская поверхность может быть ассимилирована к поверхности сферы с бесконечным радиусом; так что если бы наша сфера росла бесконечно, мы обнаружили бы, что наши измерения постепенно теряют свои римановы характеристики, пока не стало бы невозможно отличить их от евклидовых измерений.

Предположим теперь, что наша сфера продолжала изменять свою форму после достижения бесконечного радиуса; в частности, предположим, что наша поверхность постепенно начала принимать форму седла, изогнутого вниз, если мы пересекаем его с востока на запад, и изогнутого вверх, если мы пересекаем его с севера на юг. По мере того как эта двойная кривизна становилась все более выраженной, мы обнаружили бы, что наши измерения теряют свой евклидов характер и становятся все более и более заметными лобачевскими.

Таким образом, мы видим, что евклидова геометрия находится на границе между римановой и лобачевской геометрией. Когда наша поверхность меняет форму, геометрия остается римановой до тех пор, пока сохраняется малейший след сферичности, то есть положительной кривизны. Аналогично, она остается лобачевской до тех пор, пока сохраняется малейший след седлообразности, или отрицательной кривизны. Наконец, она является строго евклидовой только тогда, когда поверхность становится плоскостью, то есть имеет нулевую кривизну.

По этой причине евклидова геометрия обладает уникальностью, которой лишены неевклидовы разновидности. Последние составляют класс геометрий, и точный тип геометрии, которую мы обсуждаем, определяется интенсивностью кривизны сферы или псевдосферы, к которой она относится. Мы также видим, почему так трудно определить эмпирическими методами, является ли пространство Вселенной действительно евклидовым или нет. Это потому, что как риманова, так и лобачевская геометрия плавно переходят в евклидову геометрию.

Приведенный нами анализ относится к неевклидовым геометриям, выведенным из геометрии поверхностей, то есть к численным результатам, полученным при использовании жестких евклидовых стержней для измерения кривых поверхностей. Однако следует отметить, что обсуждаемые нами поверхности являются очень особым видом. Как сферы, так и псевдосферы известны как поверхности с постоянной кривизной. Нет необходимости вдаваться в математическое определение того, что под этим понимается; мы ограничимся изложением основной характеристики таких поверхностей.

Рассмотрим, например, сетку, сделанную из нерастяжимых нитей (нерастяжимые или недеформируемые в евклидовом смысле). Если эту сетку можно приложить с идеальным контактом к любой части плоскости, ее можно перемещать по всей плоскости, не теряя идеального контакта. То же самое верно для сферы и псевдосферы. Таким образом, сетка, которая может быть приложена с идеальным контактом к любой части сферы, может быть перемещена по любой части поверхности, не теряя при этом идеального контакта.

Единственными поверхностями, обладающими этим свойством, являются именно сфера, плоскость и псевдосфера (а также поверхности, полученные от них без растяжения); эти поверхности являются поверхностями с постоянной положительной кривизной, постоянной

нулевой кривизной и постоянной отрицательной кривизной соответственно. Таким образом, что касается формы сеток, применимых к поверхности, нет никаких средств отличить одну часть поверхности от любой другой, поскольку сетка может скользить по поверхности, сохраняя свои размеры и никогда не теряя идеального контакта с поверхностью. Другими словами, поверхность кажется изотропной и однородной, когда на ней проводятся измерения с помощью жестких евклидовых стержней или когда сетки, которые мы скользим по ней, являются евклидовыми нерастяжимыми. Это свойство называется *свободной подвижностью*.

Это уже не будет так, если мы рассмотрим поверхности с переменной кривизной, например, поверхность эллипсоида или трубы. Сетка, которая может быть приложена с идеальным контактом к одной части поверхности, потеряет свой идеальный контакт при скольжении по поверхности, если мы не деформируем ее, растягивая или сжимая.

Поскольку все три упомянутых типа геометрии (евклидова, риманова и лобачевская) действуют одинаково для всех частей пространства, в котором мы работаем, поверхности, которые изображают их в двух измерениях, обязательно имеют постоянную кривизну.

Нам еще предстоит показать связь между неевклидовой геометрией двух измерений, определяемой как геометрия, полученная с помощью евклидовых стержней на поверхности постоянной кривизны, и неевклидовой геометрией, полученной с помощью изгибающихся евклидовых стержней, *т. е.* жестких неевклидовых. Для этого рассмотрим сферу, лежащую на плоскости. Мы можем назвать южным полюсом ту точку сферы, которая соприкасается с плоскостью, и предположим, что точечный источник света находится на северном полюсе. Если сфера прозрачна для лучей света, все фигуры, начерченные на поверхности сферы, будут отбрасывать тени на плоскость. Но то же самое будет верно и для наших маленьких евклидовых стержней, которые мы размещаем рядом с этими фигурами на сфере для целей измерения.

Легко видеть, что, например, круг, начерченный на сферической поверхности, будет, вообще говоря, иметь в качестве тени эллипс на плоскости. По мере того как этот круг смещается на сфере к северному полюсу, его тень будет становиться все больше и больше, и в конце концов, когда любая точка круга совпадет с северным полюсом, она превратится в параболу, простирающуюся до бесконечности. Но поскольку тени маленьких палочек, с помощью которых мы измеряем длины на сфере, изменяются точно так же, как и тени измеряемых фигур, мы получим на плоскости точно такие же результаты Римана, которые сохраняются на сфере.

Короче говоря, если мы предположим, что на плоскости наши стандартные измерительные стержни задаются тенями стандартных измерительных стержней, используемых на сфере, мы получим риманову геометрию на плоскости. Едва ли нужно говорить, что с нашими евклидовыми представлениями о конгруэнтности нам было бы невозможно принять утверждение, что эти последовательные извивающиеся тени евклидовой длины, смещенные на двумерной поверхности сферы, были все конгруэнтны друг другу; но это не является предметом спора. Если бы мы были совершенно плоскими, двумерными существами, живущими на плоскости, и если бы не только все плоские тела, скользящие по плоскости, вели себя так же, как тени в нашем предыдущем примере, но и наши мерные стержни и наши собственные живые тела вели себя аналогичным образом, у нас не было бы иного выбора, кроме как предположить, что эти тени представляют собой смещения тел, которые двигались, оставаясь жесткими или без изменений. Соответственно, мы должны рассматривать геометрию нашего двумерного пространства как риманову.

Невозможно более ясно показать, что геометрия, которую мы приписываем пространству, является ни чем иным, как выражением свойств наших тел и измерительных стержней при перемещении, поскольку здесь мы имеем плоскость, которая является евклидовой или римановой по своей геометрии в соответствии с поведением тел, скользящих по ее поверхности. Итак, мы видим, что перед нами открыты два альтернативных метода интерпретации неевклидовой геометрии. Либо мы можем рассматривать наши мерные линейки как евклидовые и примененные к кривой поверхности, либо мы можем приписать неевклидовость поведению наших мерных линеек на плоской поверхности.^[120]

В этой главе мы рассмотрели только неевклидовы геометрии двух измерений. Геометрия Римана и геометрия Лобачевского — это, по сути, те же самые геометрии, расширенные на случай трех измерений. Мы можем легко увидеть, как возникла бы трехмерная геометрия Римана.

Нам нужно только предположить, что, в отличие от евклидовых тел, все материальные тела расширяются, как расширялись тени при смещении от фиксированного центра. Но наблюдатель Римана, конечно, не осознавал бы этого расширения из-за измененных законов распространения света и из-за расширения его собственного тела вместе со всеми другими телами. Поэтому он будет считать, что все эти тела сохраняют свою форму и размер, то есть остаются конгруэнтными при смещении. Фактически, если он применит тест практической конгруэнтности, он обнаружит, что эти тела, которые, по мнению евклидова наблюдателя, расширяются, с его точки зрения всегда остаются одинаковыми как по внешнему виду, так и по ощущениям на ощупь. Если бы наше риманово существо рассматривало тела, которые евклидов человек считал жесткими и недеформируемыми, оно без колебаний утверждало бы, что эти тела уменьшаются в размерах по мере приближения к определенной точке. Опять же, сохранение формы и размера является по сути относительным.

Все выводы, к которым мы пришли при обсуждении риманова мира двух измерений, могут быть распространены на случай трех измерений. Таким образом, риманова вселенная или сферическое пространство трех измерений является конечным, но неограниченным. Путешествуя в течение достаточного времени по геодезической линии или прямой линии, мы в конце концов должны вернуться в нашу исходную точку, а лучи света, следующие по геодезическим линиям, будут кружить вокруг нашего пространства.

Как и в случае двумерной геометрии, мы также можем представить себе трехмерное неевклидово пространство с постоянной или переменной кривизной. До открытий Эйнштейна математики занимались в основном однородными типами геометрии, поскольку предполагалось (несмотря на предчувствия Римана), что какова бы ни была практическая геометрия реального пространства, она всегда будет одинаковой во всех точках, поскольку нет очевидных причин для ее изменения от *места к месту*. Но с появлением материального или метрического поля, обусловленного более или менее капризным распределением материи, пришлось учитывать возможность изменения геометрии пространства от места к месту, и тогда стало невозможно ограничить наш анализ пространствами с постоянной кривизной. Было доказано, что переменная неевклидовость пространства, окружающего материю в теории Эйнштейна, — скажем, над экваториальной плоскостью — будет представлена геометрией поверхности переменной кривизны, которая оказывается параболоидом вращения.

Есть еще один аспект геометрии Римана, о котором может быть интересно упомянуть в связи с его возможным влиянием на форму Вселенной в теории Эйнштейна. Речь идет об

эллиптическом пространстве. Тип геометрии Римана, который мы обсуждали до сих пор, известен как сферическая геометрия Римана, потому что в случае двух измерений она оказывается евклидовой геометрией сферической поверхности. Но существует и другой тип римановой геометрии, открытый Клейном. Он называется эллиптическим пространством, хотя не имеет ничего общего с поверхностью эллипсоида. Он соответствует точно такой же геометрии, как и собственно риманова, с той лишь разницей, что пространство является связным. То есть пути непрерывного перехода от точки **A** к точке **B** в этих двух пространствах различны.

Аналогичным образом, геометрия цилиндра является евклидовой, как и геометрия плоскости (поскольку плоский лист бумаги можно свернуть в цилиндр); но его связность отличается, поскольку мы можем обойти цилиндр, следуя по геодезической линии, и все же вернуться в исходную точку.

Чтобы проиллюстрировать эллиптическое пространство в двух измерениях, как мы проиллюстрировали сферическое пространство, мы должны предположить, что ограничиваем поверхность нашей сферы одним из ее полушарий. Может показаться, что в этом случае поверхность больше не будет безграничной, поскольку она резко обрывается на экваторе, но связность эллиптического пространства такова, что каждая точка на экваторе идентична своей антиподальной точке на другой стороне экватора. Это было бы похоже на то, как если бы в нашем конкретном представлении существовали перекрестные соединения нулевой длины, объединяющиеся в одну единственную точку, каждая пара точек, расположенных диаметрально противоположно друг другу на экваторе.

Чрезвычайно трудно представить, как может быть, что диаметр, соединяющий две антиподальные точки экватора, имеет нулевую длину, но эта трудность возникает из-за нашего стремления представить расстояние между двумя точками линией, соединяющей эти две точки. Такой подход часто может быть успешным, но в более сложных случаях связности он полностью рушится. Как отмечает Эддингтон, по неясным психологическим причинам нам кажется естественным представлять расстояние между двумя точками линией, соединяющей их, полагая, что эта линия представляет собой нечто фундаментальное в природе. Но вполне вероятно, что линия, которую мы проводим, не имеет того фундаментального значения, которое мы ей приписываем, и что ее нельзя считать имеющей какое-либо внутреннее значение, кроме того, что она часто легко вводится в наше графическое описание природных явлений. Расстояние было бы более схоже с разницей температур между двумя точками, и нам никогда не пришло бы в голову изображать эту разницу температур линией, соединяющей две точки. Почему в случае расстояния такое графическое представление кажется обязательным, остается более или менее загадкой. В любом случае, графическое представление не всегда возможно, и наше описание эллиптического пространства дает нам иллюстрацию этого.

Между [прочим](#), мы видим, что проблема пространства, даже если она ограничена конкретными случаями, изученными Риманом, не исчерпывается одним лишь понятием конгруэнтности. Необходимо также учитывать связность или пути непрерывного перехода между точками. Изучение связности открывает новую отрасль геометрии, также созданную Риманом и известную как *Analysis Situs*.^[21]

ГЛАВА VI

ВРЕМЯ

Наше осознание хода времени является одним из самых фундаментальных фактов сознания, и наши ощущения автоматически располагаются в этой одномерной необратимой временной последовательности. В этом отношении мы должны признать определенное различие между пространством и временем, причем первое, как мы видели, является понятием, обусловленным в основном менее неизбежной синтетической координацией сенсорных впечатлений. Однако, с другой стороны, между пространством и продолжительностью существует заметная схожесть в том, что оба они проявляют характеристики сенсорной непрерывности.

Таким образом, в случае времени два ощущения A и B могут быть настолько близки друг к другу, что нам будет невозможно определить, какое из них было ощущено первым; то же самое может произойти в случае двух ощущений B и C , и все же мы без труда можем установить, что A предшествовало C . Эти факты выражаются несогласованными отношениями $A = B, B = C, A \neq C$, которые, как мы видели, характерны для сенсорной непрерывности, будь то в пространстве, во времени или в любой другой области. В случае времени, как и в случае пространства, только с помощью абстракции мы можем устранить эту несогласованность. Таким образом, мы представляем себе математическую продолжительность, продолжительность, в которой математическая непрерывность, как предполагается, заменила сенсорную непрерывность.

Теперь, благодаря отношению упорядочения или пути непрерывной передачи, которое, как кажется, навязывается нам природой, воспринимаемое время должно рассматриваться как одномерное, и, сохраняя естественное отношение упорядочения, мы будем приписывать ту же одномерность математической длительности. Конечно, именно к этой математической длительности мы обращаемся во всех теоретических исследованиях в механике и физике.

В первую очередь, единственное время, которое мы осознаем, — это «эгоистическое» время, время *нашего* потока сознания. Но в результате нашего восприятия изменений и движения во внешнем пространстве вселенной возникает необходимость распространить понятие продолжительности на все пространство, так чтобы все внешние события рассматривались как произошедшие в определенный момент времени, а также в определенной точке пространства.^[22]

Теперь, обсуждая пространство, мы увидели, что понятие одной и той же точки в пространстве, рассматриваемой в разное время, было неоднозначным; необходимо было уточнить систему отсчета, с помощью которой определялось пространство, и в соответствии с выбранной системой отсчета объект продолжал бы занимать одну и ту же точку или же проявлял бы движение. Аналогичной проблемой в случае времени было бы представление одного и того же момента времени в двух разных местах, т. е. одновременности двух пространственно разделенных событий.

Если бы мы позволили себе руководствоваться нашим анализом положения в пространстве, мы были бы склонны сказать, что определение одновременности пространственно разделенных событий необходимо требует выбора системы отсчета. Наблюдатель, который должен был бы высказать свое мнение о одновременности двух

событий, выбрал бы ту систему отсчета, в которой он находился в покое. Но из этого следовало бы, что изменение движения наблюдателя, а значит, и изменение системы отсчета, могло бы привести к изменению его понимания одновременности. Таким образом, одновременность проявилась бы как относительная, точно так же, как положение.

Хотя эти возможности не могут быть отвергнуты *априори* на каких-либо рациональных основаниях, классическая наука и философия здравого смысла отказывались их принимать во внимание. Дело в том, что этот тезис мог бы привести к неоднозначности понятия времени в физике, поскольку продолжительность одного и того же события варьировалась бы в зависимости от движения нашей системы отсчета. Всегда считалось, что, хотя мы можем изменить наше движение в пространстве по своей воле, с другой стороны, течение времени выходит за пределы нашего действия. Эти взгляды подтверждались поведением физических явлений, известных классической науке; поэтому была принята уникальность времени и абсолютный характер одновременности. Другими словами, одновременность и порядок следования двух пространственно разделенных событий считались фактами, выходящими за рамки нашего выбора системы отсчета.

Эта позиция была полностью оправдана в эпоху Ньютона, поскольку, поскольку *априорные* аргументы не могли решить этот вопрос, пока эксперименты не заставляли нас признать относительность одновременности и неоднозначность продолжительности, не было никаких веских причин мешать науке ненужными усложнениями. Но мы хотим подчеркнуть, что если бы эксперимент когда-нибудь показал, что одновременность не является абсолютной, то никакие рациональные аргументы не смогли бы доказать абсурдность этого мнения. Как мы увидим, интерпретация Эйнштейном некоторых сложных электромагнитных экспериментов заключается именно в признании относительности одновременности и неоднозначности продолжительности.

Перейдем теперь к проблеме конгруэнтности времени. Как и в случае с пространством, математическое время представляет собой аморфное континуум, не имеющее определенных метрик. Понятие конгруэнтности или равенства последовательных продолжительностей не имеет точного значения; определение конгруэнтности времени можно получить только после того, как мы наложим какой-либо условный стандарт измерения на индифферентную продолжительность. Мы могли бы определить как равные промежутки времени, разделяющие восход и закат солнца, или, опять же, промежутки времени, разделяющие последовательные ливни и т. д. Теоретически все такие определения были бы правомерны, поскольку в конечном счете продолжительность, как и пространство, не имеет внутренних метрических показателей.

Однако на практике мы обнаруживаем, что, как и в случае с пространством, определенный вид конгруэнтности, по-видимому, навязывается как людям, так и животным. Например, пока мы находимся в сознательном состоянии, мы все согласны с тем, что последовательные тиканья часов соответствуют тому, что наше психологическое ощущение продолжительности квалифицировало бы как конгруэнтные интервалы. Другими словами, мы, по-видимому, наделены своего рода психологическим устройством для измерения времени, которое позволяет нам различать продолжительности, которые мы называем «секундами», и те, которые мы называем «часами». То, что обычно называют чувством ритма, которое проявляется в примитивной музыке барабанных ударов и в танцах дикарей, является ни чем иным, как следствием этого интуитивного понимания временной конгруэнтности.

Поверхностный анализ ситуации может привести нас к предположению, что, вопреки нашим предыдущим утверждениям, определенный вид конгруэнтности был неотъемлемой

частью продолжительности. Однако это мнение совершенно несостоятельно, если не подкрепить его дополнительными объяснениями. Проблема, с которой мы сталкиваемся, во всех отношениях схожа с той, о которой мы упоминали при обсуждении пространства. Само по себе пространство, по крайней мере математическое пространство, аморфно. Несмотря на это, мы без труда согласимся с тем, что монета круглая, а яйцо овальное. Но мы видели в другом месте, что наше необоснованное предпочтение определенного типа конгруэнтности в пространстве было навязано поведением материальных тел при перемещении. Визуально эти тела могут выглядеть одинаково, независимо от того, где они находятся, и по этой причине они навязывают нам определение конгруэнтных пространственных интервалов. Кроме того, наши собственные конечности, шаги, которые мы делаем, земля, по которой мы ходим, — все это подсказывает нам одно и то же определение конгруэнтности.

То же самое и в случае временной конгруэнтности. Человеческий организм полон ритмических движений, таких как биение сердца, периодические сокращения артерий или дыхательные движения легких. Кроме того, младенец испытывает периодические приступы голода. Совершенно независимо от этих внутренних процессов и изменений необходимо учитывать определенные внешние механические движения, влияющие на наше тело. Так, когда мы идем нормальной походкой, наши последовательные шаги следуют друг за другом во времени определенным образом, и то же самое относится к махам наших рук. Усилием воли мы можем изменять ритм наших шагов, чередуя короткие шаги с длинными, то замедляясь, то ускоряясь. Но мы скоро осознаем, что что-то не так, потому что обнаружим, что наши нерегулярные движения требуют дополнительных усилий, так что, расслабив волю, мы автоматически вернемся к нашей нормальной походке. Возможно, что в дополнение к этим периодическим движениям, о которых мы упомянули, в нашем мозге происходят циклические процессы, придающие нашему сознанию прямые нормы временной согласованности. Однако это вопрос, который должны решать физиологи. В любом случае, когда мы понимаем, что все эти различные методы, будь то наши дыхательные движения или последовательные шаги при нормальной ходьбе, приводят к одному и тому же определению временной согласованности, нет причин удивляться тому, что определенное чувство временной согласованности навязывается нам естественным образом, и это несмотря на то, что чистая продолжительность сама по себе не имеет метрики.

До сих пор мы рассматривали временную согласованность с точки зрения дикарей и животных. Для самых элементарных целей достаточно было бы определения равных продолжительностей, полученного таким грубым способом; однако очевидно, что таким образом невозможно достичь большой точности. Наши грубые психологические часы подвержены колебаниям в зависимости от нашего психического и физического состояния; кроме того, хотя они могут различать то, что мы называем «одной секундой» и «одной минутой», они неспособны различать пятьдесят девять минут и один час. В случае с животными эта неточность в их ощущении продолжительности проявляется, когда пастушьи собаки ведут стадо обратно во время затмения или куры несут яйца под воздействием искусственного света, полагая, что наступил день. Однако, поскольку эти последние примеры допускают другие интерпретации, нам не нужно на них задерживаться и мы можем ограничиться хорошо известным фактом, что наше человеческое ощущение продолжительности варьируется от одного человека к другому и от одного психологического состояния к другому.

В дополнение к этим трудностям, наше понимание равных промежутков времени является полностью субъективным и не может стать основой для общего знания. Мы должны объективировать его, поэтому обращаемся к какому-то объективному явлению,

которое могут наблюдать все люди. Давайте предположим, для примера, что монотонное капание капель воды, падающих на кастрюлю, могло служить примитивными часами. Но все равно чего-то не хватало бы. Мы не были бы полностью удовлетворены, потому что время от времени могли бы ощущать нерегулярность в последовательных ударах капель, падающих на кастрюлю. Кроме того, если бы мы установили два таких водных часы, мы бы заметили, что капли иногда падали одновременно, а иногда последовательно. Тогда мы задались бы вопросом, какие из часов более надежны, и оказались бы в затруднительном положении, не зная, на какие из них полагаться. Так же, как в случае с пространством, где мы заменили длину наших шагов деревянными стержнями, а затем металлическими стержнями, поддерживаемыми при постоянном давлении и температуре, так и теперь, в случае с устройствами для измерения времени, мы должны найти какой-то способ выбора часов, которые удовлетворят всем нашим требованиям.

Таким образом, мы приходим к более научным методам определения времени. Психологические часы, водяные часы, песочные часы и горящие свечи, которые служили людям в ранние дни цивилизации, теперь были отброшены в пользу более точных механизмов. Как мы увидим, их показания не будут заметно отличаться от показаний наших психологических часов, но их измерения будут даваться с большей точностью. Таким образом, мы пришли к необходимости рассмотреть, какие условия должны быть выполнены, чтобы устройство для измерения времени считалось идеальным.

В общем случае мы получаем определение временной согласованности, обращаясь к принципу причинности. Следующий отрывок, цитируемый из Вейля, выражает этот факт:

«Если абсолютно изолированная физическая система (*т. е.* не подверженная внешним воздействиям) возвращается снова в точно такое же состояние, в каком она находилась в какой-то более ранний момент времени, то та же последовательность состояний будет повторяться во времени, и вся серия событий будет составлять цикл. В общем случае такая система называется **часами**. Каждый период цикла длится **одинаково** долго».

Мы получим более глубокое понимание сущности проблемы, рассмотрев различные методы определения времени, которые были предложены физиками.

Мы помним, что Ньютон называет абсолютное время «равномерно текущим». Но, конечно, эта аллюзия на время не приводит нас далеко, поскольку скорость течения можно признать равномерной только при измерении по отношению к какой-либо другой скорости течения, принятой за стандарт. Очевидно, что потребуются более точное определение. И Галилей, и Ньютон в результате измерений с помощью часов признали, что приблизительно свободные тела, движущиеся в приблизительно галилеевой системе отсчета, описывают приблизительно прямые линии с приблизительно постоянными скоростями. Затем Ньютон возвышает это приблизительное эмпирическое открытие до уровня строгого принципа, *принципа инерции*, и утверждает, что абсолютно свободные тела будут двигаться с абсолютно постоянными скоростями по идеально прямым линиям, следовательно, будут проходить равные расстояния за равное время. Когда это выражается таким образом в виде строгого принципа, пространство и время, о которых идет речь, являются абсолютным пространством и временем ньютоновской науки. Другими словами, именно принцип инерции в сочетании с пониманием пространственной конгруэнтности дает нам определение конгруэнтных отрезков абсолютного времени.

На практике определение такого рода предполагает измерения с помощью мерных стержней; то есть мы измеряем равные расстояния по прямой траектории движения тела, а

затем определяем как конгруэнтные, или равные, времена, необходимые телу для прохождения этих конгруэнтных пространственных расстояний. Очевидно, что, какими бы совершенными ни были наши измерения, всегда будут присутствовать погрешности наблюдения. Кроме того, тело, движущееся в идеальных условиях наблюдения, никогда не может быть рассмотрено; следовательно, все, на что мы можем надеяться, — это максимально возможное приближение. Но хотя физические измерения становятся неизбежными, как только мы хотим получить конкретное определение, объективный критерий равных продолжительностей, мы можем продолжать наши механические выводы чисто математическим способом, не прибегая к экспериментам. Принцип инерции, наряду с другими фундаментальными принципами механики, позволяет нам поставить механику на строгую математическую основу, и результатом этого является рациональная механика.

Можно заметить, что наука, в случае механики, пошла по тому же пути, что и геометрия. Изначально наша информация является эмпирической и страдает от всех неточностей человеческого наблюдения и всех различных непредвиденных обстоятельств, которые характеризуют физические явления. Но эта эмпирическая информация идеализируется, а затем кристаллизуется в аксиомы, постулаты или принципы, поддающиеся непосредственному математическому обращению. Конечно, по мере того как мы продвигаемся в наших чисто теоретических выводах, чтобы не потерять всякую связь с реальностью, мы должны проверять наши результаты с помощью физических экспериментов; и эта необходимость еще более очевидна в рациональной механике, чем в геометрии. Если бы дальнейшие эксперименты доказали, что наши математические выводы в механике не подтверждаются в реальном мире, нам пришлось бы изменить наши исходные принципы и постулаты или же согласиться с тем, что природа иррациональна. В механике необходимость изменения фундаментальных принципов стала императивной, когда было признано, что масса тела не является постоянной величиной, как мы полагали ранее; таким образом, именно эксперимент привел к революции. С другой стороны, в случае геометрии именно математики сами предвидели возможность существования различных неевклидовых теорий, еще до того, как эксперимент потребовал каких-либо предположений такого рода.

А теперь вернёмся ещё раз к проблеме времени. Теоретически закон инерции должен позволять нам точно определять равные интервалы, но поскольку наблюдать свободно движущиеся тела было совершенно невозможно из-за сопротивления трения, а также из-за притяжения Земли и Солнца, было выгодно найти какой-то другой физический метод определения. Это вскоре удалось. Принципы механики позволяют нам предположить, что если совершенно жесткая сфера, не подверженная воздействию внешних сил, вращается без трения вокруг оси, закрепленной в галилеевой системе отсчета, ее угловая скорость вращения будет равномерной или постоянной, измеренной в этой системе отсчета. Под «постоянной» мы понимаем *постоянную, измеренную в соответствии со стандартами временной конгруэнтности, определенными свободным телом, движущимся в идеальных условиях в соответствии с принципом инерции*. Таким образом, мы располагаем методом измерения времени, более удобным, чем тот, который обеспечивается движением свободных тел по прямой траектории. Можно отметить, что определение совпадающих промежутков времени, данное вращающейся сферой, полностью согласуется с определением в терминах причинности, сформулированным в цитируемом отрывке из Вейля.

К сожалению, и в этом случае идеальные условия никогда не могут быть созданы, поскольку мы никогда не сможем добиться идеальной изоляции, идеальной жесткости и полного отсутствия трения. Но явление вращения Земли, по-видимому, дает нам

приближение к идеальным условиям. Итак, вращение Земли, определяющее астрономическое время, считалось наиболее надежным объективным критерием совпадающих временных интервалов, который только можно было получить. Тем не менее, было хорошо известно, что такое определение все еще далеко от совершенства, поскольку скорость вращения Земли не может быть абсолютно равномерной, если «равномерность» определяется по стандартам принципа инерции. Это понимание стало очевидным, когда было принято во внимание сопротивление трению, создаваемое приливами.^[23] Трение приливов и отливов приводило бы к замедлению скорости вращения Земли (если измерять ее по точному математическому определению, данному для идеально жесткого и изолированного тела, вращающегося без трения). В дополнение к этому первому возмущающему влиянию, предполагается, что наша планета меняет свои размеры, периодически расширяясь и сжимаясь, что известно как «дыхание». Согласно законам механики, изменение формы такого рода повлекло бы за собой периодические колебания, последовательные замедления и ускорения скорости вращения Земли.

Полезно понять, как было сделано это открытие о дыхании Земли. Было замечено, что движение Луны демонстрировало колебания, которые, казалось, невозможно было объяснить в рамках закона Ньютона (), даже с учетом возмущающих воздействий Солнца и других планет. Движение Луны не только постепенно ускорялось, но и в дополнение к этому первому однонаправленному эффекту наблюдались периодические ускорения и замедления, накладывающиеся на него. Постепенное замедление скорости вращения Земли под влиянием приливов и отливов объясняло кажущееся ускорение движения Луны, но другие периодические изменения скорости нашего спутника не могли быть объяснены столь простым образом. Однако все было бы в порядке, если бы мы предположили, что скорость вращения Земли подвергается соответствующим периодическим изменениям; и тогда принципы механики показали бы, что явление такого рода может быть вызвано только периодическими изменениями размеров Земли.

Во всех этих поправках мы имеем дело с весьма сложными явлениями, связанными с законом всемирного тяготения Ньютона и законами механики. Таким образом, наши астрономические вычисления времени были скорректированы с учетом требований этих законов, считающихся абсолютно верными. Напомним, что именно вера в точность закона Ньютона привела Рёмера в 1675 году к открытию конечной скорости света. Он заметил, что спутники Юпитера появлялись из-за диска планеты на несколько минут позже, чем того требовал закон гравитации. Вместо того чтобы усомниться в точности этого закона, он приписал конечную скорость распространению света. Разумеется, его предсказания были впоследствии подтверждены прямыми измерениями на Земле. Расчеты, приведшие к открытию планеты Нептун, также были основаны на предположении о правильности закона Ньютона.

А теперь давайте предположим, что мы решили определять время совершенно другими методами. Мы могли бы, например, обратиться к колебаниям атомов какого-нибудь элемента, например кадмия. Тогда интервалы времени, отмеченные последовательными колебаниями атома, находящегося в покое в нашей галилеевой системе отсчета, были бы равны или совпадали бы по определению. Эти последовательные совпадающие промежутки времени измерялись бы длиной волны излучения, поскольку длина волны — это расстояние, пройденное световым возмущением за промежуток времени, разделяющий две последовательные колебания. Мы могли бы пойти еще одним путем, опираясь на радиоактивные процессы. Хорошо известно, что при измерении обычными часами скорость распада радия, по-видимому, подчиняется экспоненциальному закону. И примечательно, что эта скорость распада, по-видимому, ни в малейшей степени не изменяется под воздействием

окружающих условий температуры или давления. Таким образом, это явление можно рассматривать как находящееся в идеальном состоянии изоляции. Поэтому Кюри предложил определять время с помощью этой скорости распада.

Таким образом, мы видим, что было рассмотрено множество различных методов определения времени. Некоторые из них были механическими, другие — астрономическими, третьи — оптическими, а четвертые — основанными на радиоактивных явлениях. В каждом случае наши определения были такими, чтобы обеспечить максимальную простоту координации определенного типа явлений. Например, если бы в механике и астрономии мы выбрали произвольное определение времени, если бы мы определили как совпадающие интервалы между восходом и заходом солнца во все времена года, скажем, для широты Нью-Йорка, наше понимание механических явлений было бы сопряжено с серьезными трудностями. По этим новым временным стандартам свободные тела больше не двигались бы с постоянной скоростью, а подвергались бы периодическим ускорениям, для которых было бы невозможно найти какую-либо определенную причину, и так далее. В результате пришлось бы отказаться от закона инерции, а вместе с ним и от всей доктрины классической механики, включая закон Ньютона. Таким образом, изменение нашего понимания совпадения повлекло бы за собой далеко идущие последствия.

Опять же, в случае вибрирующего атома, если бы было принято какое-то произвольное определение времени, нам пришлось бы предположить, что один и тот же атом демонстрирует самые причудливые частоты. И снова было бы трудно найти удовлетворительные причины для этих, казалось бы, случайных колебаний частоты; и простое понимание самых фундаментальных оптических явлений было бы практически невозможно.

Поскольку мы понимаем, что определения временной конгруэнтности, которые мы в конечном итоге принимаем, определяются нашим желанием добиться максимальной простоты в координации какой-либо конкретной группы явлений, можно ожидать значительных расхождений в наших определениях, когда мы рассматриваем явления различной природы. Почему, в самом деле, определение, полученное на основе колебаний атомов, должно каким-либо образом согласовываться с астрономическим определением, вытекающим из вращения Земли? Даже если ограничить наше внимание колебаниями атомов одного и того же элемента, можно было бы опасаться, что разные атомы кадмия будут отбивать время с разной скоростью, поскольку, в конце концов, несмотря на то, что они во многом идентичны, их жизненные истории, должно быть, сильно различаются. Вместо этого мы обнаруживаем, что все упомянутые методы временной согласованности приводят к точно таким же определениям, насколько это можно обнаружить с помощью эксперимента. Кажется, что между скоростями эволюции различных упомянутых явлений существует общее понимание. Ситуация аналогична той, которая представлена в проблеме пространства. Там мы видели, что стержни, будь то из платины или дерева, расположенные здесь или там, давали одинаковые геометрические результаты (при условии, что они поддерживались при постоянной температуре и давлении). Опять же, казалось, что между различными стержнями существовало некое общее понимание.

Так же как эта же загадочная ситуация в случае пространства предполагала, что однородность наших пространственных измерений была обусловлена наличием всеобъемлющей физической реальности, метрического поля пространства, регулирующего поведение материальных тел и лучей света, так и теперь, как мы увидим в последующих главах, общая теория относительности заставит нас распространить те же идеи на время. Мы обнаружим, что существует пространственно-временное метрическое поле, которое разделяется на временное и пространственное поля. Временное метрическое поле будет

тогда отвечать за то кажущееся понимание, которое, как кажется, существует между различными пространственно разнесенными явлениями.

Эти новые идеи изменяют положение проблемы временной конгруэнтности. Хотя по-прежнему верно утверждать, что чистая продолжительность как математическое континуум является аморфной и не обладает внутренними метрическими свойствами, с точки зрения физика мы должны признать определенную физическую реальность этого временного метрического поля, которое контролирует процессы всех изолированных явлений.

Мы можем обобщить предыдущие утверждения, сказав, что мы определяем временную конгруэнтность таким образом, чтобы максимально упростить координацию физических явлений, независимо от конкретного типа явления, которое мы рассматриваем. То, что возможно единственное определение временной конгруэнтности, применимое к механике, оптике, электромагнетизму и астрономии, — это факт, который вряд ли можно было предвидеть *априори*; поэтому мы должны признать его неоспоримое существование как подтверждение единства природы.

И здесь мы можем упомянуть тип возражений, которые часто встречаются у людей, не утруждающих себя разграничением физического времени и психологической продолжительности. Например, утверждается, что абсурдно утверждать, что наше чувство времени возникло из желания сохранить гармонию между движениями планет и требованиями закона Ньютона, поскольку люди обладали интуитивным пониманием равных продолжительностей задолго до открытия закона Ньютона или любого другого закона природы. Мы надеемся, что те, кто потрудился проследить ход этого анализа, поймут, что эта критика совершенно не уместна. Ни один ученый никогда не утверждал, что наше чувство времени происходит от астрономических наблюдений, поскольку мы знаем, что даже у дикарей не отсутствует чувство ритма. Все, что утверждается, это то, что точное определение временной согласованности должно основываться на физических процессах или законах, поскольку наше грубое чувство времени слишком расплывчато, чтобы быть полезным в точных задачах, которыми занимается наука. Тот факт, что наше грубое восприятие времени более или менее приблизительно совпадает с более точными методами научного определения, не представляет собой большой загадки, поскольку, в конце концов, законы, которые управляют материальными процессами во внешнем мире, по всей вероятности, также управляют тем, что является материальным в наших организмах. Независимо от наших окончательных взглядов на материю и разум, мы не можем изгнать материю из нашей анатомии.

В любом случае, как только признается существование универсального типа временной согласованности, проблема заключается в выборе какого-либо конкретного явления, которое можно изучить с минимальной степенью случайности и максимальной степенью определенности. Теперь, когда мы рассматриваем астрономическое определение с точки зрения вращения Земли, мы понимаем, что если бы мы не начали с предположения об абсолютной точности закона Ньютона, то поправки, которые мы внесли, чтобы учесть особенности движения Луны, пришлось бы отбросить или заменить другими. Следовательно, если бы возникли какие-либо сомнения в точности закона Ньютона или законов механики, это привело бы к соответствующим изменениям в нашем определении временной конгруэнтности. Но очевидно, что мы не имеем права предполагать, что закон Ньютона или законы механики выше всяких подозрений. Законы физической науки не представляют собой *априорную* неизбежность; и единственная причина, по которой мы их принимаем, заключается в том, что они кажутся в высокой степени приближенными, когда мы сравниваем их рациональные следствия с результатами наблюдений. Таким образом,

приблизительность — это все, к чему мы можем стремиться в физической науке; и даже классические ученые признавали возможность того, что более точные наблюдения могут доказать, что закон Ньютона и законы механики нуждаются в корректировке. Все, что можно было утверждать, — это то, что корректировки, безусловно, будут очень незначительными, слишком незначительными, чтобы повлечь за собой какие-либо заметные изменения в нашем понимании временной конгруэнтности применительно к процессам обычных наблюдений.

Теперь мы подошли к определению Эйнштейна. Как мы увидим, оно не отличается по духу от определений классической науки; его единственное преимущество заключается в том, что оно предполагает минимум допущений и может быть реализовано конкретным образом, позволяющим достичь высокой степени точности в наших измерениях. Определение Эйнштейна, таким образом, следующее: если мы рассматриваем луч света, проходящий через галилееву систему отсчета, его скорость в этой системе будет одинаковой *независимо от относительного движения источника света и системы отсчета и независимо от направления луча*. Отсюда следует, что определение равных промежутков времени в системе отсчета будет дано путем измерения равных пространственных отрезков вдоль пути луча и утверждения, что волновой фронт будет описывать эти равные отрезки за равное время.

Как видно, определение достаточно простое, но главный вопрос заключается в том, чтобы решить, насколько оно правомерно. Классическая наука отвергла бы это определение. Почему? Потому что она утверждала бы, что определение Эйнштейна эквивалентно определению времени с точки зрения жесткого тела, вращающегося вокруг оси, но *подверженного силам трения*. Она утверждала бы, что скорость системы отсчета в неподвижном эфире привела бы к осложнениям, связанным с анизотропией, то есть изменением скорости света в зависимости от направления. Тогда необходимо было бы учитывать этот возмущающий эффект, так же как необходимо было учитывать влияние трения приливов на угловую скорость вращения Земли.

Но когда выяснилось, что вопреки ожиданиям классической науки даже в ходе сверхточных экспериментов не удалось обнаружить ни малейших следов анизотропии, возражения, которые классическая наука могла бы выдвинуть против определения Эйнштейна, утратили всякую силу. Отныне не было необходимости учитывать скорость системы отсчета в неподвижном эфире, поскольку этот дрейф эфира, по-видимому, не оказывал никакого влияния в ту или иную сторону.

Теперь может быть нелегко понять, как изотропные условия могли быть продемонстрированы экспериментом, поскольку изотропия означает, что скорость света одинакова во всех направлениях. И как мы можем установить равенство скорости во всех направлениях, если мы еще не знаем, как измерить время? Экспериментаторы решили эту проблему, прибегнув к наблюдению совпадений.

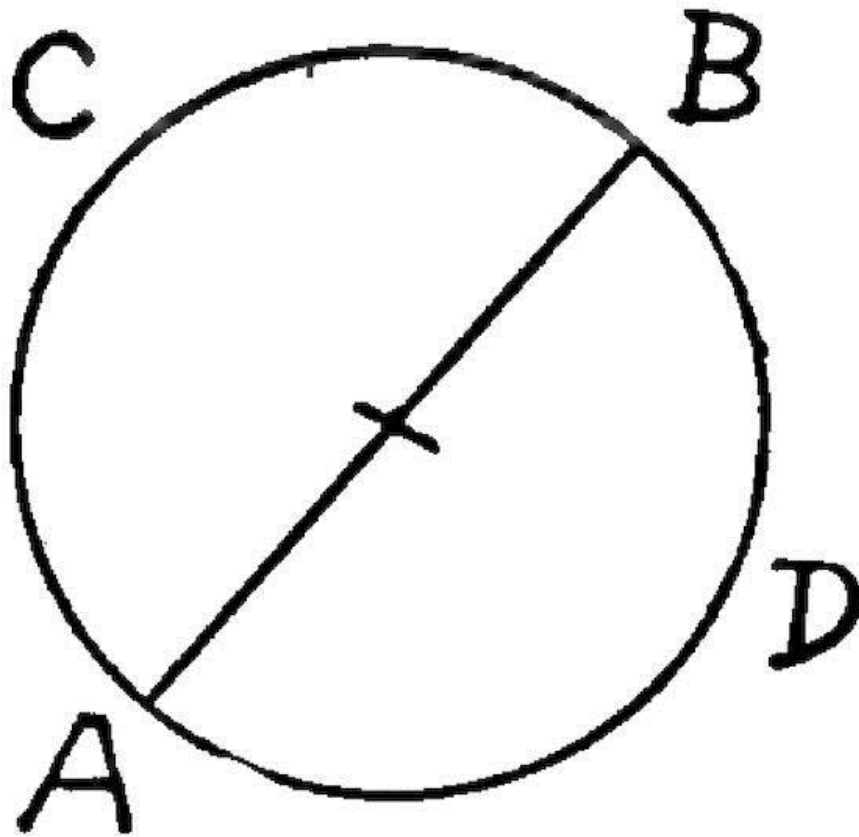


Рис. I

Следующий элементарный пример прояснит этот момент. Рассмотрим окружность, по которой два тела движутся в противоположных направлениях. Мы предположим, что оба тела покидают точку **A** в один и тот же момент времени, то есть одновременно, а затем встречаются снова в точке **B** на полпути по окружности, то есть диаметрально противоположной **A**. Нет никакой сложности в том, чтобы установить, что точка **B** диаметрально противоположна **A**, поскольку мы знаем, как измерить пространство. Все, что нам нужно сделать, это проверить, что длина кривой **ACB** равна длине **ADB**. Наблюдение совпадения, то есть одновременного присутствия двух объектов в одной и той же точке пространства, также не предполагает знания о мере продолжительности. Следовательно, хотя мы ничего не знаем об измерении времени, мы не можем избежать вывода, что два тела затратили одинаковое время, чтобы пройти от **A** до **B** по разным путям. Но эти пространственные пути равны по длине; следовательно, мы должны предположить, что скорости тел по своим соответствующим траекториям были одинаковыми. Строго говоря, мы можем утверждать только то, что средняя скорость была одинаковой, поскольку одно тело могло замедлиться, а затем снова ускориться, наверстывая потерянное время. Но если мы повторим эксперимент с кругами разного размера и если в каждом случае тела встретятся в противоположной точке, мы вправе утверждать, что не только средняя скорость, но и мгновенная скорость в каждый момент времени одинакова для обоих тел. Короче говоря, благодаря пространственным измерениям в сочетании с наблюдением

совпадений мы смогли установить равенство двух скоростей, даже не зная ничего о измерении времени.

Более подробное изложение той же проблемы можно представить следующим образом: волны света, одновременно покидающие центр сферы, возвращаются в центр *также одновременно*, после того как отражаются от высокополированной внутренней поверхности сферы. Как и в предыдущем примере, волны света прошли одинаковые расстояния за одинаковое время; отсюда мы делаем вывод, что их скорость одинакова во всех направлениях.

Поскольку этот эксперимент был проведен и дал результаты, которые мы только что описали, даже несмотря на то, что дрейф эфира, вызванный движением Земли, должен был изменяться по направлению и интенсивности, изотропность пространства для распространения света была таким образом установлена. (Описанный эксперимент представляет собой лишь схематическую форму эксперимента Майкельсона.) Следует отметить, что в этом эксперименте используется только наблюдение совпадений (даже пространственные измерения могут быть исключены).^[125] Когда мы понимаем, что совпадения являются наиболее точной формой наблюдения, мы понимаем, почему определение Эйнштейна является оправданным.

Оптическое определение имеет явное превосходство над определениями классической науки. В то время как при вращении Земли нам приходилось предполагать правильность закона Ньютона и законов механики, чтобы определить компенсации, необходимые из-за дыхания Земли или трения приливов, в данном случае мы практически ничего не предполагаем, а то немногое, что мы предполагаем, вытекает из самых точных экспериментов, известных науке.

Важность определения Эйнштейна заключается не столько в том, что оно позволяет нам получить точное определение времени в нашей галилеевой системе отсчета, сколько в том, что оно позволяет нам координировать исчисления времени в различных галилеевых системах отсчета, находящихся в относительном движении. До тех пор, пока мы ограничиваемся расчетами пространства и времени в нашей системе отсчета, мы можем, как и раньше, обращаться к колеблющимся атомам для измерения совпадающих временных интервалов и к жестким стержням для измерения пространства. Когда же мы пытаемся соотнести измерения пространства и времени между различными галилеевыми системами отсчета, находящимися в относительном движении, возникают удивительные последствия. Мы обнаруживаем, что концепции пространственной и временной конгруэнтности классической науки должны быть значительно модифицированы. Они теряют те атрибуты универсальности, которыми мы привыкли их наделять. Тогда выясняется, что конгруэнтность может быть определена универсальным образом только тогда, когда мы рассматриваем протяженность четырехмерного пространства-времени.

Как мы уже упоминали, любое изменение в наших концепциях пространственной и временной конгруэнтности не является чисто локальным явлением. Благодаря единству природы мы будем вынуждены изменить все наше понимание взаимосвязи явлений и не должны удивляться тому, что совершенно новая наука является необходимым результатом новых определений Эйнштейна. Старые законы отбрасываются, на их место приходят новые; и Эйнштейн, следуя своим математическим выводам с помощью строгой логики, *без введения каких-либо гипотез ad hoc*, доказал, что если его новое определение конгруэнтности пространства-времени физически верно, то должна последовать целая серия до сих пор непредполагаемых природных явлений, которые должны быть выявлены с

помощью точных экспериментов. Как бы удивительно это ни казалось, предсказания Эйнштейна до сих пор подтверждались в каждой мельчайшей детали.

ГЛАВА VII

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И РАССТОЯНИЕ

Мы уже в общих чертах упомянули о значении конгруэнтности и пространственного расстояния. Теперь нам остается найти способ определить эти понятия в строгой математической форме. Мы помним, что равенство или конгруэнтность двух пространственных расстояний между двумя парами точек AB и CD было неопределенным понятием, зависящим в основном от поведения наших измерительных линеек. Затем было обнаружено, что альтернативное представление неевклидовой геометрии (в случае двумерной геометрии) можно получить, если предположить, что расстояние между точками во всех случаях может быть определено с помощью измерений с помощью жестких евклидовых линеек; но в то время как в случае евклидовой геометрии все точки должны рассматриваться как существующие в одной плоскости, в случае неевклидовой геометрии было бы так, как если бы точки были расположены на соответствующей кривой поверхности. Таким образом, в случае Земли неевклидово расстояние между двумя точками, скажем, Нью-Йорком и Парижем, будет задано евклидовой длиной большого круга, проходящего между этими точками, то есть кривой линией, следующей контуру поверхности Земли. С другой стороны, евклидово расстояние между этими же двумя точками будет задано евклидовой длиной прямой линии, соединяющей их и проходящей, конечно, через внутреннюю часть Земли.

Теперь мы предлагаем исследовать математическое выражение расстояния в двух измерениях; мы будем предполагать, что обсуждаем его с точки зрения евклидовых измерений, проводимых на поверхностях. Сначала рассмотрим случай, когда поверхность является неограниченной плоскостью. Если мы хотим определить положение точки на плоскости, мы должны отнести ее к какой-либо системе отсчета. Три века назад Декарт разработал метод, с помощью которого можно было достичь этого результата. Он рассмотрел две семьи евклидовых прямых, которые мы можем назвать соответственно горизонтальными и вертикальными. Линии этих двух пересекающихся семей равномерно распределены (с точки зрения евклидовой геометрии), так что они образуют систему ячеек или сеть равных евклидовых квадратов. Научное название системы сеток — *система координат*, но название «система сеток», введенное Эддингтоном, имеет то преимущество, что дает более наглядное представление о том, что она собой представляет. Тип системы сеток, состоящей из горизонталей и вертикалей, введенный Декартом, называется *декартовой системой координат*.

Если каждой вертикали и каждой горизонтали системы координат присвоить последовательные целые числа, начиная с нуля и бесконечно, то мы увидим, что точка плоскости, которая совпадает с пересечением некоторой конкретной горизонтали и некоторой конкретной вертикали, определяется числами, которые соответственно представляют эти две линии. Таким образом, *каждая точка пересечения* определяется двумя числами, и эти числа называются *декартовыми координатами* точки. Конечно, с помощью этого метода мы не можем определить положения точек, которые не совпадают с углами наших квадратов. Но ничто не мешает нам предположить, что между упомянутыми вертикалями и горизонталями лежит бесконечное число других подобных линий, которым будут присвоены промежуточные дробные числа. Отныне каждая точка плоскости может

рассматриваться как определяемая пересечением некоторой конкретной горизонтали и некоторой конкретной вертикали.

В какой степени допустимо утверждать, что точки на плоскости определены этим методом? Если мы игнорируем существование системы координат, то ничего не определено, но если мы считаем систему координат *данной*, то каждая точка плоскости может считаться однозначно определенной. Короче говоря, точки определяются *не* в абстрактном смысле (), а по отношению к системе координат. В этом методе определения положения точек нет ничего загадочного. Так, в повседневной жизни, когда мы договариваемся встретиться с другом на углу Пятой авеню и Сорок второй улицы, мы невольно определяем место встречи с помощью декартовой системы координат, заданной авеню и улицами. В данном случае система координат не является строго декартовой, поскольку улицы и проспекты могут не образовывать идеально равных евклидовых квадратных кварталов, но общий принцип остается тем же. Разумеется, определение нашей точки встречи не имело бы никакого значения, если бы проспекты и улицы не существовали. Таким образом, мы снова видим, что точки могут быть определены только относительно системы координат.

Существенной характеристикой декартовой процедуры является использование системы отсчета, представленной отдельными семействами пересекающихся линий. Тот факт, что рассматриваемые нами линии являются взаимно перпендикулярными прямыми, образующими сеть евклидовых квадратов, не имеет особого значения. Вместо горизонтальных и вертикальных линий можно было бы выбрать два семейства пересекающихся кривых, которые мы могли бы назвать кривыми «*u*» и «*v*». Конечно, в этом случае наша система сеток была бы криволинейной, а пространства, ограниченные сетками, больше не были бы евклидовыми квадратами и даже не обязательно имели бы равную площадь. Это обобщение метода Декарта было введено Гауссом, и по этой причине криволинейные системы сеток также называются *гауссовыми системами сеток*. Как и раньше, каждая точка будет определяться числами, обозначающими две кривые любой из семейств, то есть числами, обозначающими кривую *u* и кривую *v*, которые пересекаются в этой точке; и эти два числа будут называться *гауссовыми числами* или *координатами точки*.

Необходимость обобщения декартовых координат путем введения гауссовых координат возникает из того факта, что декартовы сетки из равных квадратов могут быть нанесены только на плоскость и никогда не могут быть нанесены на криволинейную поверхность, такую как, например, поверхность шара. Следовательно, если бы мы игнорировали использование гауссовых сеток, нам было бы невозможно локализовать точки на криволинейной поверхности с помощью сетки, нанесенной на поверхность. Наиболее близким приближением к сети квадратов на поверхности сферы была бы сеть меридианов и параллелей, и такая сеть не является сетью равных евклидовых квадратов; это криволинейная или гауссова сетка, сужающаяся к точкам на Северном и Южном полюсах.

На самом деле, мы также используем гауссовы координаты в повседневной жизни. Так, когда мы говорим, что положение корабля составляет столько-то градусов широты и столько-то градусов долготы, наша сетка, состоящая из меридианов и параллелей, является гауссовой, а широта и долгота корабля составляют его гауссовы координаты.

Определив, как можно определить положение точек на любой поверхности с помощью некоторой системы координат, давайте теперь посмотрим, как предлагается выражать расстояние между двумя точками, измеренное по поверхности с помощью жестких евклидовых стержней. Здесь мы должны действовать с максимальной осторожностью. Вспомним, что именно это подразумевается. Любая определенная линия широты (*u*) — это линия, вдоль которой широта (*u*) остается постоянной, а долгота (*v*) изменяется

непрерывно, и, наоборот, любая определенная линия долготы (v) — это линия, вдоль которой долгота (v) остается постоянной, а широта (u) изменяется непрерывно. Точно так же на поверхности Земли линия широты или параллель — это линия, вдоль которой широта остается постоянной, а долгота изменяется, тогда как линия долготы или меридиан — это линия, вдоль которой происходит обратное.

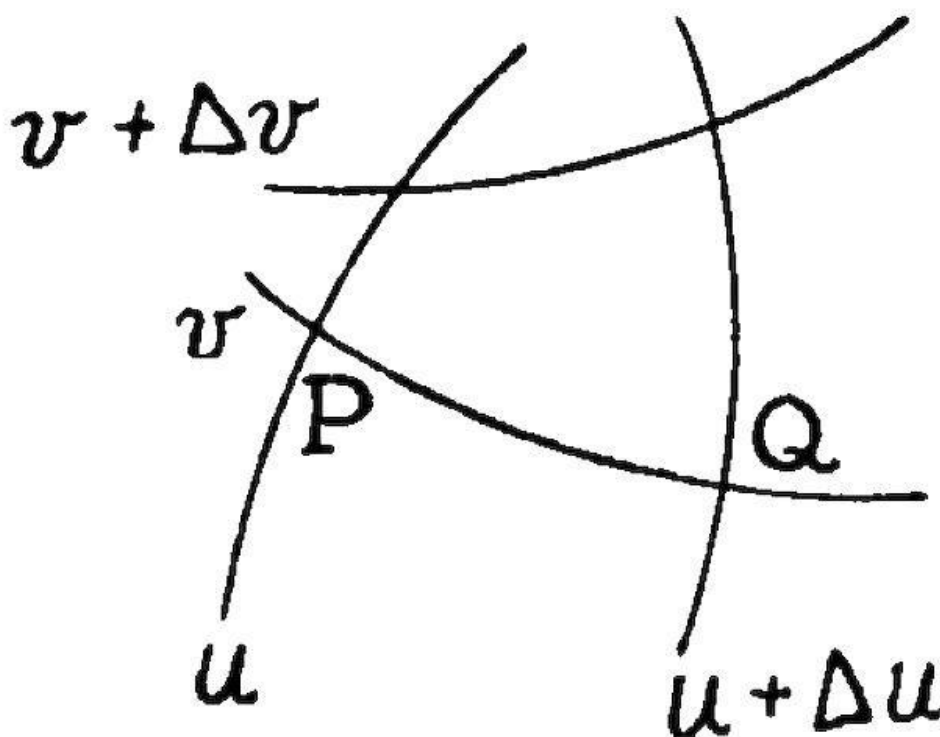


Рис. II

Предположим, что мы хотим выразить расстояние между двумя точками P и Q , определяемыми пересечениями определенной линии v с двумя последовательными линиями u (рис. II). Координаты двух точек соответственно равны (u, v) и $(u + \Delta u, v)$, где Δu представляет собой увеличение значения u при переходе от P к Q на линии v .

Ни в коем случае нельзя сказать, что расстояние PQ (которое мы будем называть Δs) задается значением Δu , поскольку Δu — это не что иное, как разница между числами, служащими для локализации точек; оно не имеет ничего общего с расстоянием. Чтобы развеять любые сомнения по этому поводу, можно заметить, что если сравнить линии v с параллелями, а линии u с меридианами, то точки P и Q будут заданы пересечениями двух последовательных меридианов с одной и той же параллелью. В этом случае Δu будет соответствовать разнице в долготе между двумя точками; и, очевидно, разница в долготе не является критерием расстояния, поскольку при одинаковой разнице в долготе расстояние уменьшается от экватора к полюсу. Короче говоря, расстояние Δs между P и Q не может быть полностью определено Δu .

Однако, с другой стороны, так же как расстояние между двумя точками, лежащими на одной параллели, зависит от разницы в долготе, так и расстояние Δs между P и Q должно быть функцией разницы координат Δu . Достаточно общее выражение величины Δs , когда

она определяется в терминах другой величины Δu , от которой она зависит, дается

$$\Delta s = A\Delta u + B\Delta u^2 + C\Delta u^3 + \dots$$

формулой

где A, B, C являются соответствующими величинами. Однако, если мы рассматриваем точки, расположенные чрезвычайно близко друг к другу, Δu становится чрезвычайно малым по значению, и в результате Δu^2 и Δu^3 и т. д. становятся еще в разы меньше. Таким образом, в предельном случае, когда две точки находятся на бесконечно малом расстоянии друг от друга, высшие степени Δu становятся настолько незначительными, что их можно пренебречь по сравнению с Δu . Таким образом, мы получаем $\Delta s = A\Delta u$, и чтобы указать, что мы рассматриваем бесконечно малые расстояния, мы заменяем символ Δ на d и получаем

$$ds = Adu.$$

Обычно обозначают A как g_{11} , так что, используя квадраты, наша формула принимает вид

$$ds^2 = g_{11}du^2.$$

И теперь нам нужно рассмотреть важный вопрос. Что такое g_{11} ? Что оно представляет собой? Мы не будем вдаваться в его полное математическое значение, но можем упомянуть некоторые его важные характеристики. В нашей иллюстрации меридианов и параллелей рассмотрим различные точки пересечения, определенные пересечениями последовательных параллелей с двумя фиксированными меридианами. Разница в долготе между этими различными парами точек, конечно, будет постоянной и будет задаваться одной и той же неизменной величиной du . Поскольку расстояния ds между этими парами точек варьируется от полюса до экватора, из $ds^2 = g_{11}du^2$ мы видим, что g_{11} должно варьироваться соответствующим образом, когда мы рассматриваем различные части поверхности сферы. Фактически, благодаря постоянству du , мы должны иметь g_{11} пропорциональным ds^2 . Если бы меридианы были параллельными линиями, а не сужались к полюсам, g_{11} оставалось бы постоянным. Отсюда следует, что знание того, как g_{11} варьируется от точки к точке, дает нам информацию о форме системы сеток, и, наоборот, расположение системы сеток дает нам информацию о значении g_{11} от места к месту.

С другой стороны, если, оставив две точки P и Q фиксированными, мы выберем новую систему сетки, du может измениться по значению, и фактически может также появиться разница dv , поскольку при изменении системы сетки нет причин, по которым P и Q должны по-прежнему лежать на одной кривой v . Следовательно, мы должны сделать вывод, что даже в фиксированной точке нашей поверхности значение g_{11} будет подвержено изменениям, когда мы изменяем нашу систему сетки.

Точно такие же аргументы применимы, если мы рассмотрим выражение расстояния между двумя бесконечно близкими точками на одной и той же кривой u . Тогда мы получим $ds^2 = g_{22}dv^2$, где g_{22} — величина, которая, как правило, отличается от g_{11} .

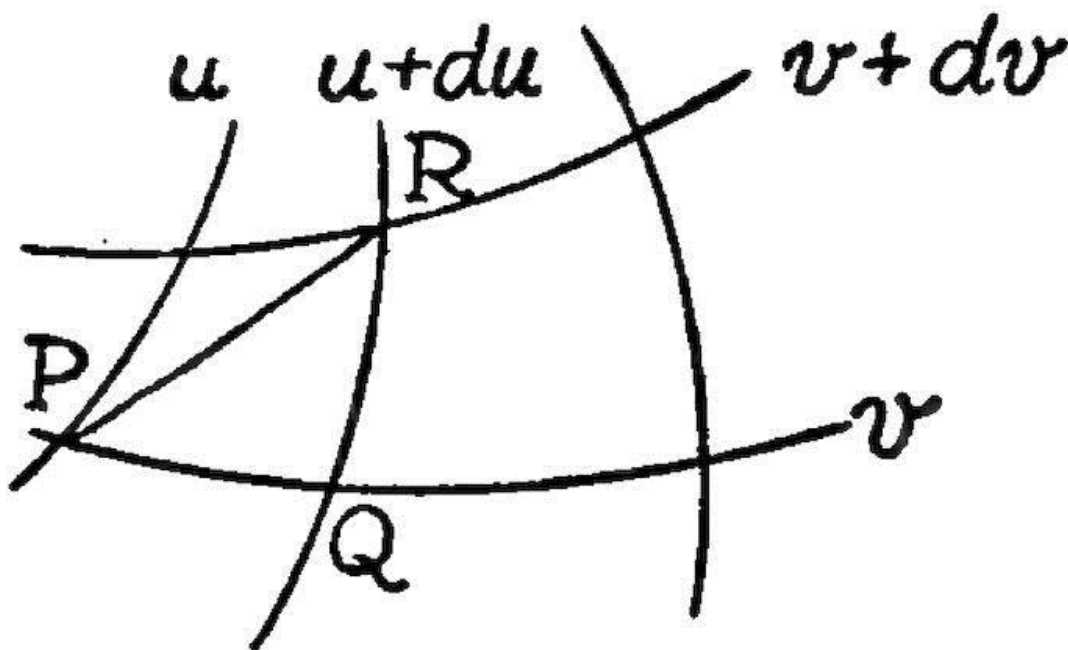


Рис. III

Теперь мы должны рассмотреть более общий случай, когда две точки лежат на разных кривых u и v (рис. III). Из вышесказанного мы знаем, что квадрат расстояния PQ определяется формулой $g_{11}du^2$, а квадрат расстояния QR выражается формулой $g_{22}dv^2$. Но этой информации явно недостаточно, чтобы определить квадрат расстояния PR , поскольку на это расстояние также влияет наклон линий PQ и QR . Очевидно, что для определения значения этого наклона необходимо ввести новую величину, которая будет называться g_{12} и g_{21} . В этих условиях квадратное расстояние между бесконечно близкими точками P и R

$$ds^2 = g_{11}du^2 + g_{12}dudv + g_{21}dudv + g_{22}dv^2$$

можно записать как

но поскольку g_{12} и g_{21} всегда идентичны, мы имеем

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}dudv + g_{22}dv^2.$$

Мы можем записать эту формулу более лаконично, обозначив u как u_1 , а v как u_2 . В этом случае наша формула принимает вид

$$ds^2 = \sum g_{1k}du_1du_k$$

где $\sum$ обозначает суммирование, а для i и k мы подставляем значения 1 и 2 всеми возможными способами. Это важнейшее математическое выражение было открыто Гауссом; оно предназначено для того, чтобы сыграть важнейшую роль в физической теории относительности.

Чтобы понять геометрический смысл g_{12} , рассмотрим частный случай ромбовидной системы координат, в которой координатные линии образуют угол θ (рис. IV). Элементарная геометрия учит нас, что

$$PR^2 = PQ^2 - 2 \cos \theta \cdot PQ \cdot QR + QR^2.$$

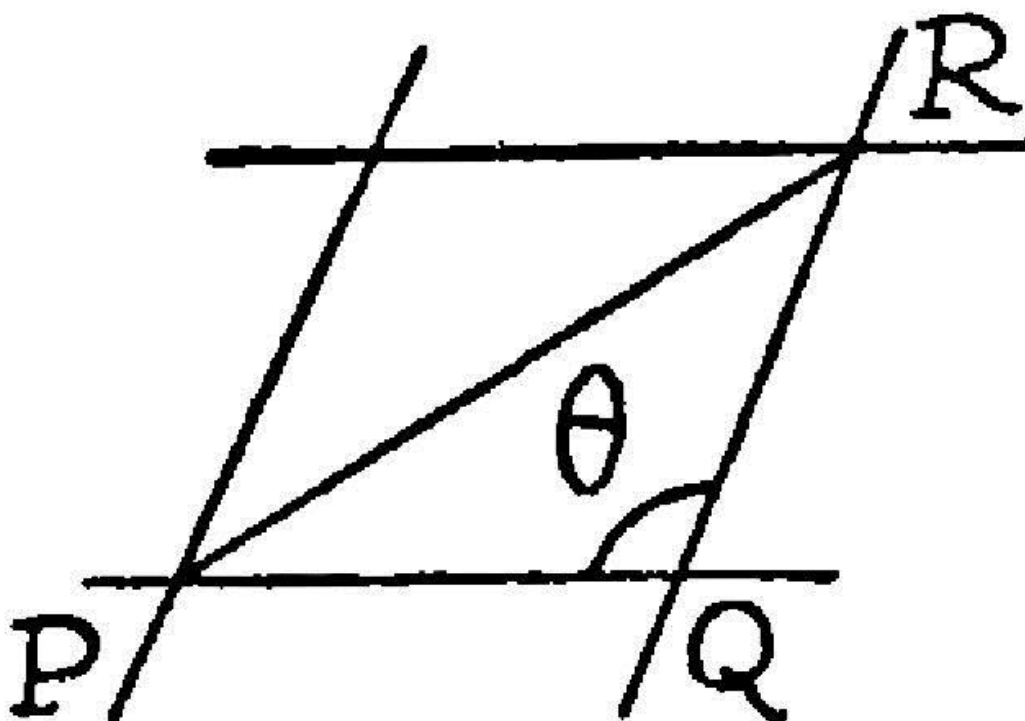


Рис. IV

Поскольку линии всегда равноудалены, g_{11} и g_{22} остаются постоянными во всей системе сеток; следовательно, мы можем приравнять их к единице и записать

$$ds^2 = du^2 - 2 \cos \theta du dv + dv^2.$$

В этой формуле мы имеем

$$g_{11} = 1; \quad g_{12} = -\cos \theta; \quad g_{22} = 1$$

из чего видно, что g_{12} представляет собой косинус угла, образованного линиями u и v в точке, где вычисляется g_{12} (126). Поскольку $\cos \frac{\pi}{2} = 0$, мы видим, что там, где линии u и v перпендикулярны, g_{12} исчезает. Следовательно, всякий раз, когда мы имеем выражение ds^2 ,

$$ds^2 = g_{11}du^2 + g_{22}dv^2,$$

такое как

из которого g_{12} отсутствует, мы можем быть уверены, что линии u и v ортогональны в точке, для которой было вычислено g_{12} .

Если линии u и v остаются перпендикулярными во всей системе сеток, g_{12} исчезнет не только для одной конкретной точки, но и для всех точек поверхности.

Рассмотрим теперь частный случай декартовой сетки из равных квадратов. В этом случае линии u и v , будучи ортогональными и равноудаленными, мы имеем g_{11} и g_{22} постоянными, причем g_{12} исчезает. Следовательно, мы можем заменить g_{11} и g_{22} единицей и получим

$$ds^2 = du^2 + dv^2,$$

результат, полностью согласующийся с теоремой Пифагора о квадрате гипотенузы.

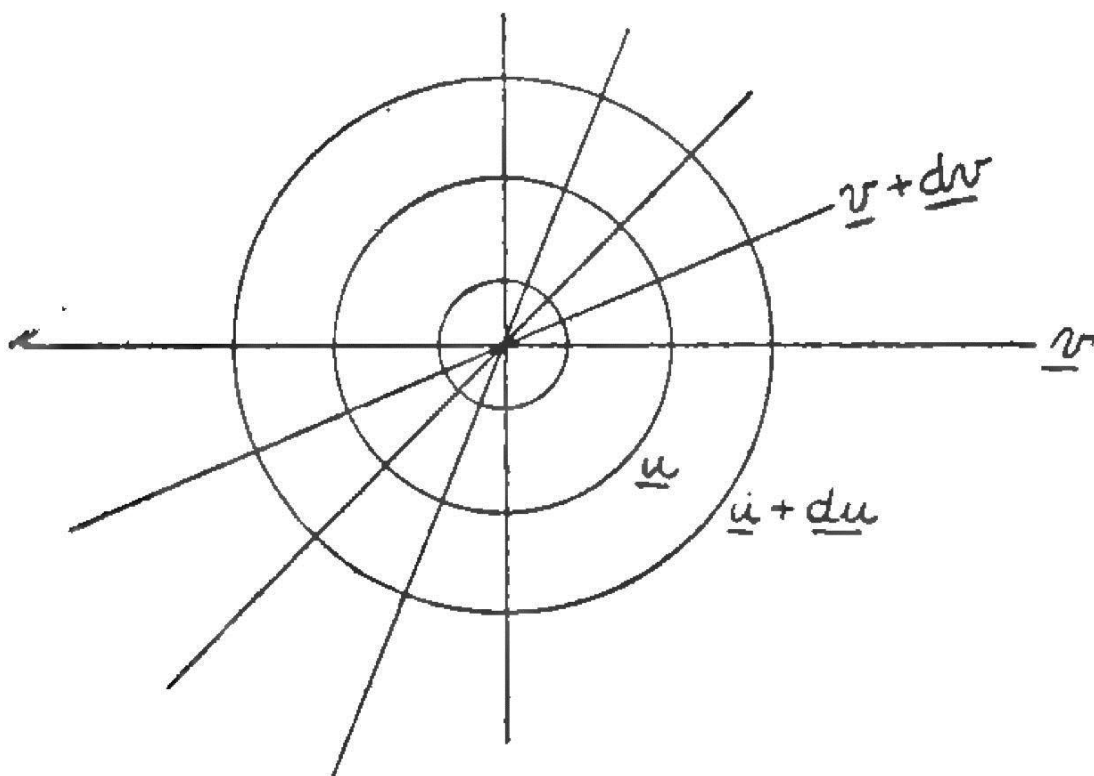


Рис. V

Предположим теперь, что на этой же плоскости мы начертили бы другой тип системы координат, известный как полярная система (рис. V). Она состоит из симметрично расположенных линий v , исходящих из центральной точки O . Линии u тогда задаются равноудаленными концентрическими окружностями с центром O . В этих условиях

$$ds^2 = du^2 + u^2 dv^2.$$

выражение для ds^2 принимает вид

Другими словами, мы имеем

$$g_{11} = 1; \quad g_{12} = 0; \quad g_{22} = u^2,$$

что еще раз доказывает, что значения g варьируются в зависимости от выбранной системы координат. Как и ранее, g_{12} исчезает по тем же причинам, что и ранее, а именно потому, что линии нашей системы координат ортогональны в точках пересечения.

Наконец, мы можем рассмотреть систему координат, определяемую параллелями и меридианами на сфере, где мы можем предположить, что $u = \text{constant}$ дает параллель, а $v = \text{constant}$ дает меридиан. Здесь мы имеем

$$ds^2 = du^2 + \cos^2 u dv^2,$$

так что

$$g_{11} = 1; \quad g_{12} = 0; \quad g_{22} = \cos^2 u;$$

Из этих различных примеров можно сделать следующие выводы:

1°. Когда определенная система координат нанесена на поверхность и ее линии пронумерованы последовательно, каждая точка поверхности однозначно определяется двумя числами (двумя гауссовыми числами или координатами). Эти числа, конечно, представляют собой числа соответствующих кривых u и v , на пересечении которых находится точка. Изменение формы или нумерации линий u и v влечет за собой изменение координатных чисел любой заданной точки на поверхности.

2°. Наряду с этими двумя гауссовыми числами в каждой точке, определяющими положения точек в системе координат, существуют четыре числа g , а именно g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} . Но поскольку g_{12} и g_{21} всегда идентичны, нам нужно учитывать только три из этих величин g . Значения этих g в точке изменяются при изменении нашей системы сеток. В большинстве случаев они также изменяются от места к месту в пределах одной и той же системы сеток. Однако, если сетки всегда ортогональны в точках пересечения, g_{12} исчезает в каждой точке поверхности. Если линии u и v всегда имеют одинаковый наклон по поверхности и всегда равномерно распределены, три g останутся постоянными на всем протяжении; их значения будут равны $1, \cos^2 \theta, 1$. Если система сеток является декартовой, то есть образует равные квадраты g_{12} , то, конечно, исчезает, в то время как, как и раньше, g_{11} и g_{22} остаются постоянно равными единице.

3°. Величина квадрата расстояния между двумя бесконечно удаленными точками

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}dudv + g_{22}dv^2$$

определяется формулой

где значения g_{11} , g_{12} и g_{22} будут меняться при изменении системы координат или при рассмотрении разных областей одной и той же системы координат. Единственный случай, когда g_{11} , g_{12} и g_{22} останутся постоянными, — это когда система координат является равномерной, то есть представляет собой сеть из двух семейств параллельных линий, пересекающихся друг друга.

Примечательно, что, хотя все, что входит в выражение ds^2 , изменяется при изменении нашей системы сеток, значение ds^2 , определяющее квадрат расстояния между двумя бесконечно удаленными точками, остается неизменным. Другими словами, ds^2 является *скалярной величиной, инвариантом*. Это позволяет нам дать новую интерпретацию числам g_{11} , g_{12} и g_{22} ; они, по-видимому, действуют как корректирующие факторы, уравнивающие изменения du и dv . Если мы сравним изменения значений du и dv при изменении системы сеток с продвижением белки в барабане, то увидим, что действие g_{11} сходно с обратным вращением барабана, компенсирующим продвижение белки, так что белка остается неподвижной в пространстве. [\(1271\)](#)

До сих пор мы рассматривали выражение расстояния между бесконечно близкими точками, но на практике мы также хотим установить длину протяженной кривой, прочерченной на поверхности. В этом случае мы продвигаемся от точки к точке вдоль кривой, вычисляя последовательные бесконечно малые расстояния ds , а затем суммируем их, или, как было бы правильнее сказать, интегрируем их. Таким образом, мы получаем $s = \int ds$. Также мы можем утверждать, что площадь dA бесконечно малого

$$dA = \sqrt{g_{11}g_{22} - g_{12}^2}dudv.$$

параллелограмма, образованного двумя линейными элементами du и dv , задается формулой

Здесь мы снова можем вычислить любую конечную площадь с помощью процесса интегрирования, поэтому мы видим, что конечную геометрию поверхности можно изучать, сосредоточив свое внимание на бесконечно малых частях, а затем распространяя наши результаты от места к месту. Короче говоря, этот метод сводится к применению дифференциального исчисления к геометрическим задачам, и по этой причине он называется **дифференциальной геометрией**.

Несмотря на то, что этот метод дифференциальной геометрии оказался очень мощным, есть случаи, когда его нельзя применить. Однако, поскольку в задачах физики, которые нас интересуют, трудностей не возникает, нам не нужно останавливаться на ряде частных

случаев, которые в нынешнем состоянии наших знаний представляют интерес только для математиков.^[28]

И теперь мы подошли к основной части открытий Гаусса. Мы видели, что на заданной поверхности значения трех g в любой точке, или, более правильно, их изменения от точки к точке, определяются нашим выбором системы координат. Но мы знаем, что система координат, хотя и в значительной степени произвольна, все же не является полностью независимой от природы лежащей в основе поверхности. Например, декартова система координат из равных квадратов или ромбовидная система, обе из которых лежат на плоскости, не могут быть нанесены на сферу. Точно так же сеть меридианов и параллелей, лежащая на сфере, не может быть нанесена на плоскость. По этой причине представление расположения океанов и континентов на плоской карте неизбежно искажается в той или иной степени.

Короче говоря, каждый вид поверхности обладает бесконечным множеством возможных систем сетки, но системы, применимые к одному типу поверхности, никогда не применимы к поверхностям любого другого типа. Поскольку декартова сетка и ромбовидная сетка являются единственными, которые обеспечивают постоянство трех координат (g) по всей поверхности, и поскольку такие системы координат могут быть нанесены только на плоскость или на поверхности, полученные из нее без растяжения (цилиндр, конус), мы видим, что постоянство трех координат (g) является характеристикой евклидовой геометрии. Это, конечно, не означает, что все системы координат, прослеживаемые на плоскости, дают постоянные значения для трех g ; это просто означает, что на плоскости всегда можно проследить декартову систему координат, тогда как на всех других типах поверхностей эта задача невозможна.

Все это доказывает, что кривизна поверхности должна оказывать модифицирующее влияние на распределение g , поскольку при искривленной поверхности постоянное распределение невозможно. Следовательно, мы должны сделать вывод, что распределение гауссовых функций регулируется двумя отдельными факторами: во-первых, расположением системы координат на поверхности; во-вторых, внутренней кривизной поверхности в разных точках. Гаусс осознал важность разделения этих двух факторов и определения, в какой степени они влияют на распределение гауссовых функций (g).

Очевидно, что если бы было возможно найти некоторое математическое выражение, связывающее g в одной точке с g в соседних точках, и если бы это математическое выражение оставалось неизменным по значению при изменении системы сеток, несмотря на изменения отдельных g , которые должны сопровождать изменение системы сеток, то мы получили бы величину, которая, выходя за рамки нашего выбора системы сеток, относилась бы исключительно к форме самой поверхности, *т. е.* к ее кривизне в рассматриваемой точке. Но прежде чем исследовать природу открытий Гаусса, необходимо вспомнить некоторые элементарные понятия.

Мы знаем, что кривизна окружности в каждой точке ее окружности является постоянной величиной, задаваемой формулой $\frac{1}{R}$, где R — радиус окружности. Но если вместо окружности мы начертим на плоскости любую произвольную кривую, кривизна будет меняться от точки к точке вдоль кривой. Кривизна кривой в данной точке A тогда определяется определенной окружностью, которая касается кривой в точке A . На самом деле существует бесконечное количество окружностей с различными радиусами, касательных к кривой в точке A ; но среди этих окружностей одна выделяется тем, что она, так сказать, более идеально касательна, чем все остальные. В то время как касательные

окружности пересекают кривую в двух точках, совпадающих в A , эта привилегированная окружность пересекает ее в трех таких точках. Она называется *оскулирующей* окружностью (*osculare* означает «целовать» на латыни). Кривизна кривой в точке A определяется кривизной ее оскулирующего круга в точке A . Назовем R радиусом этого оскулирующего круга, тогда кривизна кривой в точке A будет задана формулой $\frac{1}{R}$ (рис. VI).

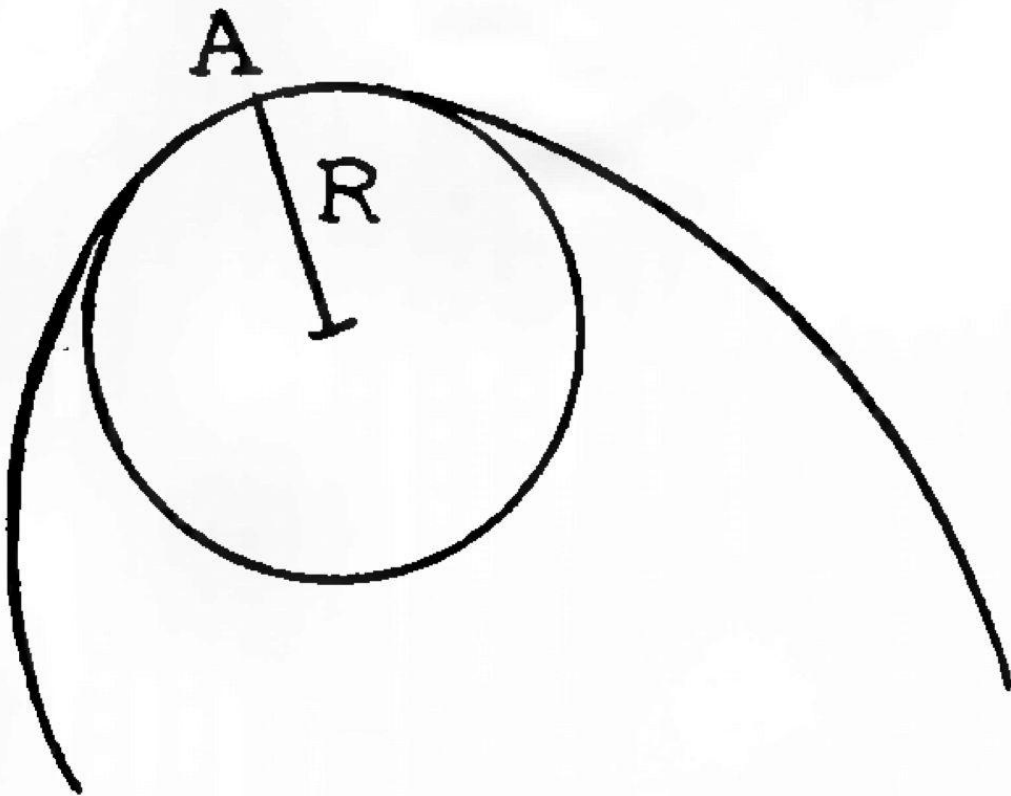


Рис. VI

Теперь мы должны перейти к кривизне поверхности. В точке **A** на поверхности, где необходимо вычислить кривизну, мы проводим нормаль к поверхности. Затем через эту нормаль мы проводим плоскость, которая, конечно, пересекает поверхность по плоской кривой. Мы предполагаем, что эта нормальная плоскость вращается вокруг нормали как оси, и таким образом получаем ряд плоских кривых пересечения, определенных нормальной плоскостью и поверхностью. Каждая из этих кривых, проходящих через точку **A**, обладает определенной кривизной в точке **A**, и эта кривизна может быть вычислена с помощью соответствующего осциллирующего круга.

Здесь проявляется геометрический факт. Выясняется, что в общем случае существуют две замечательные позиции пересекающейся нормальной плоскости, перпендикулярные друг другу и, следовательно, разделяющие поверхность по двум кривым (1) и (2), ортогональным друг другу в точке **A**. Кривизна одной из этих кривых, скажем, кривой (1), меньше кривизны всех других кривых, полученных путем вращения плоскости вокруг нормали в точке **A**, в то время как кривизна второй кривой (2) больше всех остальных. Эти две кривизны называются двумя главными кривизнами поверхности в точке **A** и обозначаются соответственно $\frac{1}{R_1}$ и $\frac{1}{R_2}$.

Затем мы определяем общую кривизну или гауссову кривизну поверхности в точке **A** как произведение $\frac{1}{R_1 R_2}$. Если наша поверхность является сферой, то $R_1 = R_2$, следовательно, гауссова кривизна становится $\frac{1}{R^2}$ или, проще говоря, $\frac{1}{R}$, где R — радиус нашей сферы; но в

общем случае R_1 и R_2 не равны. Согласно , в зависимости от характера поверхности две главные кривизны могут иметь одинаковые или противоположные знаки. Когда они имеют

одинаковый знак, общая кривизна $\frac{R_1 + R_2}{2}$ очевидно положительна; следовательно, поверхность проявляет положительную кривизну в рассматриваемой точке. Сфера и эллипсоид являются примерами поверхностей, имеющих положительную кривизну по всей площади. Однако, когда поверхность имеет форму седла, две главные кривизны имеют противоположные знаки; тогда общая гауссова кривизна отрицательна, и мы имеем поверхность с отрицательной кривизной в рассматриваемой точке.

9А теперь вернёмся к открытиям Гаусса. Мы видели, что на распределение кривизны по поверхности влияет как наш выбор системы сеток, нанесённых на поверхность, так и внутренняя природа или кривизна поверхности от точки к точке. Затем мы также упомянули, что если бы было возможно найти некоторое математическое выражение, связывающее кривизну Гаусса (g) в точке A с кривизной Гаусса (g) в соседних точках, и если бы это математическое выражение оставалось неизменным по значению при изменении системы сеток, несмотря на изменения отдельных кривизн Гаусса (g), сопровождающие изменение системы сеток, то мы имеем дело с величиной, которая, выходя за рамки нашего выбора системы сетки, относится исключительно к форме самой поверхности, т. е. к ее кривизне в рассматриваемой точке. Этот важный математический инвариант, построенный с помощью g , был открыт Гауссом; он обычно обозначается буквой G и называется *скалярным* или *инвариантом кривизны* в точке A . Затем Гаусс доказал, что этот скаляр кривизны G был не чем иным, как минус двукратной общей кривизной, определенной ранее. Следовательно, мы можем записать:

$$\text{Total curvature at } A = -\frac{G}{2} \text{ (computed at } A\text{)}$$

Помимо постоянного коэффициента, эти две кривизны одинаковы, поэтому мы будем часто называть кривизну Гаусса (G), даже если это название не является строго точным. Кривизна Гаусса [0 \(\[29\]\)](#)

Прежде чем продолжить, мы должны напомнить, что метод, который мы использовали для исследования геометрии поверхностей и использования евклидовых жестких стержней для проведения измерений по поверхности, приводит к тем же геометрическим результатам, которые были бы получены при исследовании двумерного пространства (например, плоскости) с помощью неевклидовых стержней. Следовательно, если бы мы проводили измерения с помощью неевклидовых измерительных стержней на плоскости, мы, конечно, получили бы неевклидову геометрию, и гауссова кривизна плоскости больше не исчезала бы, как это было бы в случае использования евклидовых измерительных стержней. [\(\[30\]\)](#)

С точки зрения наших неевклидовых измерений та же плоскость будет искривленной. Таким образом, мы видим, что неисчезновение гауссовой кривизны не обязательно означает искривление в обычном визуальном смысле. Оно скорее отражает взаимосвязь между поверхностью и поведением наших измерительных стержней; другими словами, оно отражает неевклидовость, и слово «кривизна» может ввести в заблуждение. Таким образом, в общем случае мы можем утверждать, что тип геометрии нашего двумерного пространства от места к месту определяется значением гауссовой кривизны от точки к точке, а значит, законом распределения гауссовой кривизны (g) по всему пространству; и что когда

пространство является евклидовым, распределение гауссовой кривизны (g) всегда таково, что гауссова кривизна исчезает во всех точках, независимо от выбранной конкретной системы координат.

Все эти открытия Гаусса, относящиеся к двумерному пространству, были расширены Риманом на пространства любого числа измерений. Риман обнаружил, что для пространств более чем двух измерений результаты становятся гораздо более сложными. В случае пространства n измерениями нам, конечно, требуются n гауссовы координаты для определения положения точки в нашей системе координат, которая теперь становится n -мерной. Как и раньше, мы можем представить себе декартову и гауссову системы координат, причем первая является обобщением n измерений нашей сети евклидовых квадратов. Что касается инвариантного математического выражения квадрата расстояния между двумя точками, то теперь оно содержит большее количество слагаемых. В случае трехмерного пространства мы больше не имеем трех отдельных величин g в каждой точке; это число увеличивается до шести. В случае четырехмерного пространства оно увеличивается до десяти, а в случае n -мерного пространства — до $\frac{n(n+1)}{2}$.

Ввиду важности четырехмерного расширения в теории относительности, мы запишем выражение квадрата расстояния для четырехмерного пространства. Если мы назовем du_1, du_2, du_3, du_4 четыремя разностями между четырьмя гауссовыми координатами наших двух бесконечно близких точек A и B и обозначим десять g чисел в каждой точке как g_{11}, g_{12} и т. д., то получим

$$\begin{aligned} ds^2 = & g_{11}du_1^2 + 2g_{12}du_1du_1 \\ & + 2g_{13}du_1du_3 + 2g_{14}du_1du_4 \\ & + g_{22}du_2^2 + 2g_{24}du_2du_4 \\ & + g_{33}du_3^2 + 2g_{34}du_3du_4 \\ & + g_{44}du_4^2 \end{aligned}$$

или, более лаконично,

$$ds^2 = \sum g_{ik}du_i du_k$$

где мы присваиваем i и k все целые значения от 1 до 4, переставляя их всеми возможными способами. Соответственно, в дальнейшем мы будем называть g «

Продолжая действовать по тому же методу, что и в случае двух измерений, мы обнаруживаем, что теперь существует несколько инвариантных типов отношений между значениями g_{ik} в каждой определенной точке и их изменениями во всех точках, близких к этой. Значения этих выражений остаются неизменными при изменении нашей системы сеток; следовательно, как и в случае гауссовой кривизны для двумерного пространства, они относятся к геометрии самого пространства, а не к нашему выбору системы сеток. Одно из этих инвариантных выражений является обобщением гауссовой кривизны G , расширенной до четырех измерений. Другие относятся к новым типам кривизны, которые появляются только в пространствах более чем двух измерений. Невозможно представить эти кривизны с помощью двумерной поверхности, потому что тогда они отождествляются с обычной

гауссовой кривизной.^[31] По этой причине только при изучении кривых пространств более чем двух измерений эти новые формы кривизны стали заметными.

Из сказанного можно предположить, что при изучении геометрии пространства с более чем двумя измерениями возникнут значительные сложности. Так, мы видели, что в двумерном пространстве гауссова кривизна G полностью определяет геометрию пространства. Например, если гауссова кривизна исчезает по всему пространству, поверхность является евклидовой или, по крайней мере, плоской.^[32] Точно так же, если гауссова кривизна является неизменной положительной или отрицательной величиной по всему пространству, поверхность является поверхностью с постоянной кривизной, либо положительной, как у сферы, либо отрицательной, как у псевдосферы.

Но когда мы рассматриваем пространства более чем двух измерений, знание обобщенной гауссовой кривизны во всем пространстве уже не достаточно для определения его геометрии. Хотя эта кривизна может исчезать или иметь одно и то же ненулевое значение во всем пространстве, мы не можем из этого сделать вывод, что пространство обязательно плоское или имеет постоянную кривизну. Таким образом, хотя исчезновение обобщенной гауссовой кривизны G является необходимым условием для плоскости пространства, оно ни в коем случае не является достаточным. В фактической геометрии пространства все еще остается место для большой степени неопределенности.

Чтобы полностью определить геометрию пространства более чем двух измерений, мы должны указать значения компонентов тензора B_{ikst} (упомянутого в примечании); в четырехмерном пространстве в каждой точке имеется двадцать таких компонентов. Можно отметить, что, в отличие от гауссовой кривизны G , B_{ikst} не является инвариантной. Она разбивается на компоненты, значение каждого из которых может изменяться при изменении системы сеток. Однако, несмотря на эту изменчивость, B_{ikst} по-прежнему определяет кривизну пространства, а значит, по-прежнему относится к чему-то внутреннему и не зависящему от нашего выбора системы сеток. Такова одна из характеристик *тензора*. Этот конкретный тензор из двадцати компонентов (в четырехмерном пространстве) известен как *тензор Римана-Кристоффеля*.^[33] Любопытно, что он был открыт Риманом не при исследовании геометрии пространства, а при рассмотрении проблемы теплопроводности.

Только когда все двадцать компонентов тензора B_{ikst} исчезают в каждой точке, можно утверждать, что четырехмерное пространство является евклидовым или, по крайней мере, плоским. Таким образом, в то время как для двух измерений евклидовость была обеспечена при выполнении одного условия в каждой точке, а именно исчезновении гауссовой кривизны $G = 0$, с другой стороны, когда мы переходим к четырем измерениям, требуется двадцать условий, которые задаются исчезновением в каждой точке двадцати выражений, которые в совокупности составляют тензор Римана-Кристоффеля B_{ikst} .

Можно также упомянуть, что в дополнение к тензору Римана-Кристоффеля B_{ikst} Эйнштейн использовал другой тензор G_{ik} (ранее открытый Риччи), который в четырехмерном пространстве определяется десятью отдельными соотношениями между значениями g_{ik} в одной точке и их значениями в соседних точках. Исчезновение этого другого тензора G_{ik} в каждой точке, то есть исчезновение десяти новых выражений компонент в каждой точке, само по себе недостаточно для обеспечения евклидовости пространства; хотя, конечно, это исчезновение накладывает определенные ограничения на неевклидовость пространства. Эти ограничения менее строгие, чем те, которые определяются исчезновением двадцати компонентов тензора Римана-Кристоффеля, что

обеспечивает идеальную плоскость; с другой стороны, они более строгие, чем те, которые налагаются простым исчезновением гауссовой кривизны G .^[34]

Обращаясь к физическому значению чисел g_{ik} , мы можем отметить, что именно эти величины g_{ik} входят в выражение расстояния и, следовательно, служат для определения конгруэнтности. Если мы имеем дело с чисто аморфным континуумом, в котором природа не навязывает нам никакого конкретного определения конгруэнтности или расстояния, то не может существовать никакого конкретного распределения чисел g_{ik} , присущего континууму. Но если, с другой стороны, как в случае пространства или, лучше сказать, четырехмерного пространства-времени Эйнштейна, природа навязывает нам точное определение практической конгруэнтности — если, другими словами, наше континуум, вместо того чтобы быть аморфным, обладает определенной метрикой или структурой — то будет существовать распределение g_{ik} , присущее континууму, и это распределение будет определять его метрическое поле.

Те же аргументы применимы к структурным тензорам кривизны континуума, а именно к G , к G_{ik} и к B_{ikst} . Если континуум аморфен, эти структурные тензоры, вместе с составляющими их тензорами g_{ik} , не имеют смысла, пока мы не определились с каким-либо теоретическим типом конгруэнтности геометрии; и даже тогда они представляют характеристики структуры, которые являются столь же условными, как и выбранная нами геометрия. Но если, с другой стороны, в континууме существует определенная метрика, то эти структурные тензоры представляют собой кривизны континуума, которые мы можем рассматривать как физически существующие, а не как чисто условные.

ГЛАВА VIII

ЗНАЧЕНИЕ СЛОВА «ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ»

ВСЕ наши предыдущие обсуждения и объяснения были сделаны с целью подготовить почву для теории относительности Эйнштейна. Однако, прежде чем мы перейдем к обсуждению собственно теории Эйнштейна, было бы полезно достичь более точного понимания научного значения слов «относительность» и «абсолютность».

В традиционной философии абсолютная реальность — это первичная, самосуществующая реальность, субстанция, истинное бытие или метафизическая реальность, тогда как относительная реальность — это вторичная, зависимая реальность, которая обязана своей формой бытия отношению к подлинно реальному.^[35]

Что же касается научной философии, то абсолютная реальность является мифом. Все, что мы можем познать в природе, в конечном счете сводится к структуре, то есть к отношениям. Следовательно, если мы примем это очень общее понимание слова «относительность», то даже на данном этапе можем предположить, что теория Эйнштейна не может ничего добавить к нашей вере в фундаментальную относительность всего знания. Очевидно, что когда физики говорят об абсолютных и относительных величинах, они имеют в виду категории, отличающиеся от категорий философов.

Рассмотрим, например, длину объекта или сравнение двух длин, расположенных в разных частях пространства. При обсуждении математического пространства мы видели, что в соответствии с нашими условными стандартами измерения эти длины могут быть равными или неравными; и именно этот аспект относительности выражал фундаментальную математическую относительность длины. Но мы также видели, что, хотя в теории определение конгруэнтности было условным, на практике, если мы хотели определить конгруэнтность так, чтобы не вступать в противоречие с нашими чувственными восприятиями, природа навязывала нам определенный тип конгруэнтности (практическую конгруэнтность). Далее мы увидели, что тела, которые таким образом были определены как конгруэнтные, составляли то, что известно как евклидовы тела, и что предполагалось, что они остаются абсолютными по длине, независимо от движения наблюдателя.

В этих условиях, когда физик, такой как Эйнштейн, в отличие от математика, утверждает, что длина является относительной, он имеет в виду фактическую длину, *измеренную так называемым твердым телом*; и он хочет сказать, что эта длина окажется неопределенной и будет зависеть в основном от наших условий наблюдения. Таким образом, мы видим, что относительность физика не является неизбежной, как относительность математика. Это не *априорный* тип относительности, выражающий тривиальную относительность к стандарту. Это, по сути, эмпирический тип относительности, всегда подлежащий доказательству или опровержению с помощью точных эмпирических испытаний. Две следующие иллюстрации могут быть полезны:

Рассмотрим телеграфный столб, возвышающийся вертикально над землей. Угол зрения, под которым этот столб будет нам казаться, по сути относительный, поскольку его величина изменяется в зависимости от расстояния наблюдателя до столба. Конечно, этот угол зрения в принципе относительный, поскольку его величина зависит от системы геометрии, которую мы можем принять, но мы больше не обсуждаем этот математический аспект относительности. Мы предполагаем, что наша система измерений была

зафиксирована в соответствии с требованиями практической конгруэнтности, т. е. что наши измерения выполняются с помощью обычных жестких стержней и, следовательно, являются евклидовыми. В этом случае угловое расстояние, под которым мы воспринимаем данный столб, полностью определяется, когда наше расстояние от столба указано. Но, с другой стороны, он является относительным, поскольку не является имманентным полюсу; он изменяется в зависимости от нашего относительного расстояния и, таким образом, сводится к простому соотношению между полюсом и нашим расстоянием до него.

В отличие от относительности угла зрения, классическая наука считала, что длина самого шеста была абсолютной, не имея отношения к нашему относительному положению как наблюдателей. Опять же, если мы рассуждаем как математики, мы можем утверждать, что эта длина, в свою очередь, является относительной, поскольку зависит от наших соглашений об измерении. Но если мы предположим, что наши соглашения об измерении были зафиксированы требованиями практической конгруэнтности, то этот тип относительности исключается. В таком случае классическая наука считала, что длина шеста была абсолютной, поскольку ее числовое значение составляло столько-то футов или столько-то метров, независимо от нашего положения и независимо от нашего движения. Именно это последнее предположение оспаривает Эйнштейн. Абсолютная величина — это не длина шеста, поскольку она, аналогично углу зрения, является относительной. Абсолютная величина — это скорее нечто, что выходит за пределы пространства и времени и относится к абсолютному миру пространства-времени.

Второй пример можно привести с помощью понятий массы и веса. В результате открытий Ньютона было понято, что вес тела является относительным, поскольку его значение варьируется в зависимости от близости и распределения материи. На поверхности Земли его значение составляло столько-то тонн, на поверхности Луны оно значительно уменьшалось, а в межзвездном пространстве полностью исчезало. Тело само по себе не имело веса. Вес не был имманентным свойством тела; он сводился к простому выражению физической связи между положением тела и положением окружающей материи.

В отличие от относительности веса, классическая наука предполагала, что масса является абсолютной. Масса тела, где бы оно ни находилось и в каких бы условиях ни наблюдалось, считалась неизменной величиной, остающейся всегда одинаковой. По этой причине масса, в отличие от веса, считалась неотъемлемой частью материи. Она не была результатом физического отношения, а отражением самого существования материи.

Правда, когда эксперименты Бухерера показали, что масса электрона, по-видимому, увеличивается с его скоростью, масса, несомненно, казалась относительной. Но предполагалось, что это кажущееся увеличение массы электрона следует приписывать не какому-либо изменению массы самого электрона, а деформации его электромагнитного поля, вызванной движением через эфир. Это было похоже на то, как если бы эфир увлекался за электроном в его движении, точно так же, как корабль, движущийся по океану, увлекает за собой более или менее значительный объем окружающей воды в зависимости от скорости своего движения. Другими словами, реального изменения массы самого электрона не происходило, и это убеждение классической науки было выражено принципом сохранения массы.

Предыдущие примеры учат нас двум вещам: во-первых, недостаточно просто заявить, что понятие является относительным; мы должны дополнить наше утверждение, указав, по отношению к каким окружающим условиям это понятие является относительным: например, по отношению к расстоянию наблюдателя, его движению или распределению материи. Во-вторых, мы видим, что единственным экспериментальным способом отличить

относительную величину от абсолютной является изменение окружающих условий и модификация характера движения и положения наблюдателя. Если бы значение величины изменялось при этих условиях, мы могли бы быть уверены, что она является относительной. Но, очевидно, что нам может быть невозможно изменить все окружающие условия; мы не можем, например, изменить распределение звезд. Поскольку в этой вселенной целое влияет на часть, а часть влияет на целое, может показаться, что наше различие между абсолютными и относительными величинами сводится к простому выражению наших ограничений.

Эта точка зрения, несомненно, верна в теории, но следует помнить, что физика может развиваться только путем последовательных приближений. Например, эксперимент доказывает, что воздействие одного явления на другое уменьшается с расстоянием. Поэтому физик вполне вправе предположить, что если возмущающая причина находится достаточно далеко, ее влияние можно пренебречь. Таким образом, посредством процесса постепенного исключения он может представить себе явления, протекающие в полной изоляции от всех посторонних воздействий. В дальнейшем именно эти идеально изолированные явления он подвергнет испытаниям относительности, последовательно подвергая их тем посторонним воздействиям, над которыми он может осуществлять некоторый контроль. В этих условиях вопрос об абсолютности или относительности данного понятия или величины приобретает определенное физическое значение.

В классической науке всегда предполагалось, что расстояние в пространстве, продолжительность во времени и одновременность между удаленными событиями являются абсолютными понятиями. Независимо от относительного движения или положения наблюдателя, независимо от распределения материи, эти понятия оставались неизменными. Эйнштейну удалось доказать, что эти мнения должны быть ошибочными, поскольку они несовместимы с некоторыми точными оптическими экспериментами. Он показал, что относительное движение наблюдателя не может не оказывать модифицирующего влияния. Отныне расстояние, продолжительность и одновременность становятся относительными понятиями, выражающими отношения между измеряемыми величинами и относительным движением наблюдателя. Так же как угловое расстояние, под которым объект виднелся наблюдателю, ни в коей мере не было имманентным самому объекту, поскольку оно менялось в зависимости от положения наблюдателя, так и теперь длина, продолжительность и одновременность ни в коей мере не являются имманентными реальному миру, поскольку они меняются в зависимости от движения наблюдателя.

Еще раз необходимо обратить внимание на то, что обсуждаемая нами относительность является по сути физической; она является вторичной по отношению к нашим определениям практической конгруэнтности. Отсюда следует, что эта относительность расстояния и продолжительности должна соответствовать изменениям, которые можно увидеть и почувствовать. Эти изменения не являются результатом произвольных изменений, которые мы можем ввести в наши математические системы измерения. Они не являются чисто концептуальными; они являются воспринимаемыми.

Дело в том, что системы измерения навязываются нам природой, и под этим мы подразумеваем, что они отражают то, что мы действительно видим и ощущаем, а не то, что мы могли бы видеть и ощущать, если бы мир был таким, каким его мог бы представить какой-нибудь туманный математик. Подобным образом Эйнштейн в специальной теории доказал, что масса, которую классическая наука считала абсолютной, на самом деле является относительной, поскольку зависит от относительного движения наблюдателя. Общая теория относительности пошла еще дальше, доказав, что масса является относительной еще в одном смысле. Она установила, что не только относительное

движение наблюдателя, но и распределение окружающей материи влияют на массу данного тела. Таким образом, предчувствия Маха оправдались. Вслед за относительностью массы ряд других понятий, таких как температура, давление, электрические и магнитные силы, а также сила тяжести, в свою очередь, оказались относительными, зависящими от движения наблюдателя.

Теперь, хотя эпитет «*относительный*» в его широком смысле подразумевает относительность по отношению к окружающим условиям, мы увидим, что в теории Эйнштейна он используется в основном в отношении движения наблюдателя. *Таким образом, относительная величина будет означать величину, значение которой зависит от относительного движения наблюдателя; абсолютная величина будет означать величину, значение которой не зависит от этого движения.* Основная цель теории будет заключаться в том, чтобы отделить величины, которые являются относительными, от величин, которые являются абсолютными. Абсолютные величины будут тогда представлять абсолютный, общий мир, о котором различные наблюдатели получают лишь частные представления. Этот абсолютный мир будет миром пространства-времени, противостоящим относительному миру пространства и времени.

Среди абсолютов, открытых теорией, можно упомянуть электрический заряд, энтропию, скорость света *в вакууме* (по крайней мере, в специальной теории) и длину так называемого *интервала Эйнштейна* между любыми двумя точками в четырехмерном пространстве-времени; этот последний тип абсолюта сохраняется во всей теории, как специальной, так и общей.

ГЛАВА IX

ПРИНЦИПЫ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

БОЛЬШАЯ часть трудностей, с которыми сталкиваются философы и непрофессионалы при понимании теории Эйнштейна, возникает из-за путаницы между различными значениями, которые могут быть приписаны понятиям «относительность пространства и движения». Студентам, уже обладающим некоторыми знаниями в области классической науки, конечно, нечего бояться путаницы такого рода. Но, учитывая распространенные заблуждения по этому вопросу, мы кратко упомянем различные принципы, более подробно разъясняя их по мере их появления в ходе изложения книги. Здесь мы должны назвать:

1. *Первоначальную математическую относительность пространства и времени.*
2. *Кинематический или визуальный принцип относительности.*
3. *Динамический или классический принцип относительности Галилея и Ньютона.*
4. *Специальный принцип относительности Эйнштейна.*
5. *Общий принцип относительности Эйнштейна.*
6. *Радикальный принцип относительности Маха-Эйнштейна.*

Рассмотрим эти различные принципы по порядку. **Математический тип относительности** — это тот, о котором мы уже упоминали при обсуждении математического пространства и времени. Он подразумевает, что расстояние в пространстве, даже после того, как пространство было отнесено к системе отсчета наблюдателя, имеет чисто относительную величину; таким образом, два расстояния в пространстве могут быть равными или неравными в зависимости от наших соглашений об измерении. Даже после того, как мы определились с нашими соглашениями об измерении, величина пространственного расстояния может быть выражена только величиной нашего измерительного стержня; и если бы ночью все длины сократились одинаково, то на следующий день, проснувшись, мы не заметили бы никакой разницы. Аналогичные выводы применимы и к времени.

Теперь этот математический аспект относительности пространства и времени, казалось бы, противоречит повседневному опыту; ведь если бы ночью все предметы двигались в два раза быстрее, нет ни малейшего сомнения, что проявились бы определенные очень заметные физические изменения. Например, быстро вращающийся маховик мог бы разорваться под огромной нагрузкой центробежных сил. Однако следует помнить, что математик обсуждает чисто аморфное математическое пространство; и хотя теория Вейля проливает новый свет на относительность величины, относя ее к радиусу Вселенной в целом, весь вопрос все еще остается несколько неясным. Не стоит больше тратить время на эти чисто математические концепции, а лучше заняться принципами относительности, которые относятся к реальной вселенной физики, к реальному пространству вместе с его метрическим полем.

Кинематический или визуальный принцип относительности, который известен по крайней мере со времен древних греков, гласит, что тело можно считать движущимся только по отношению к какому-либо другому телу. Например, если мы рассмотрим частный случай Земли и Солнца, то в зависимости от того, к чему мы отнесем движение — к Земле

или к Солнцу, — мы придем к выводу, что либо Солнце вращается вокруг Земли каждые двадцать четыре часа, либо Земля вращается вокруг своей оси.

Оба метода представления будут эквивалентны. Опять же, нам было бы невозможно сказать, приближается ли к нам тело все быстрее и быстрее с ускоренным движением или же это мы движемся с ускоренным движением к телу, поскольку визуально в обоих случаях все выглядит одинаково. Очевидно, что этот кинематический или визуальный принцип подразумевает полную относительность всех движений и покоя, а значит, и полную относительность пространства.

Однако более тщательное изучение динамики материальных систем доказывает несостоятельность визуального принципа. Было обнаружено, что на поведение материальных систем, а значит, и на результаты механических экспериментов, влияют абсолютное ускорение и вращение в пространстве, хотя они остаются совершенно независимыми от абсолютной скорости.

Ньютоновский, или галилеевский, или классический, или динамический принцип относительности выражает эту неуловимость абсолютной скорости или галилеева движения в пространстве, по крайней мере в том, что касается механических экспериментов, в то время как он, напротив, подчеркивает физическое значение абсолютного ускорения и вращения. Как хорошо известно, именно эта абсолютность или физическая значимость ускорения и вращения заставила Ньютона признать, что пространство не может быть относительным. То, что ньютоновский принцип относительности значительно ограничивает сферу применения визуального принципа, легко понять на следующем примере:

Если бы тело двигалось относительно нашей системы отсчета с относительной скоростью, *но без относительного ускорения*, то согласно ньютоновскому принципу мы были бы вправе утверждать, что *с помощью механических экспериментов* невозможно определить, движемся ли мы к телу или тело движется к нам. В этой степени визуальный принцип удовлетворяется. Но, с другой стороны, если бы между нами и телом существовало относительное ускорение вращения, механические эксперименты позволили бы нам установить, какая часть относительного ускорения или вращения была вызвана нашим собственным абсолютным ускорением или вращением в пустом пространстве, а значит, и какая часть была вызвана движением тела.

Теперь мы подошли к **специальному принципу относительности Эйнштейна**. Он является точной копией принципа Ньютона, поддерживающего относительность скорости и абсолютность ускорения.^[36] Единственное различие между этими двумя принципами заключается в том, что в принципе Эйнштейна неуловимость абсолютной скорости в пространстве () больше не ограничивается механическими экспериментами и материальными системами; электромагнитные и оптические эксперименты теперь поставлены на одну и ту же основу.

Пока мы говорим о различных принципах относительности, мы можем обсудить еще два типа, которые играют важную роль в расширении специальной теории Эйнштейна, известной как общая теория относительности. Здесь мы знакомимся с **общим принципом относительности**. Этот принцип гласит, что математические выражения законов природы должны сохранять одинаковую форму независимо от нашего выбора системы отсчета, будь то галилеева (т. е. без ускорения в пустом пространстве), ускоренная или даже извивающаяся, как осьминог, в то время как наши часы, расположенные по всей системе отсчета, могут тикать с самыми причудливыми скоростями. Классический принцип относительности допускал эту инвариантность законов природы только в случае

галилеевых систем отсчета и синхронизированных часов, и то только в случае законов механики. Специальный принцип признавал, что эта инвариантность верна даже для электромагнитных законов, но, как и прежде, только для галилеевых систем отсчета. Общий принцип относительности, распространяя неизменность законов природы на все типы движений системы отсчета, знаменует собой отправную точку для возможной релятивизации ускорения, которое до сих пор выделялось как отстраненное и явно абсолютное.

Радикальный **принцип относительности Маха-Эйнштейна** является результатом естественного стремления к полной релятивизации всех видов движения, как вращательного и ускоренного, так и равномерного. Это достигается путем отнесения всех динамических эффектов, сопровождающих ускорение и вращение материальных и электродинамических систем, к движению по отношению к материальной вселенной в целом. Согласно этому принципу, который по-прежнему носит в высшей степени спекулятивный характер, не может существовать никакой наблюдаемой разницы между вращением тела по отношению к вселенной звезд и вращением звезд вокруг тела; в обоих случаях возникали бы точно такие же динамические эффекты центробежной силы, так что не осталось бы никаких следов абсолютного движения в пустом пространстве. Мы видим, что принцип Маха представляет собой попытку оправдать кинематический принцип, несмотря на трудности динамического характера, которые были причиной его отклонения. Отчасти с целью удовлетворения принципа Маха Эйнштейн разработал гипотезу цилиндрической вселенной. Принцип пал бы, если бы астрономические наблюдения доказали, что такая форма вселенной неприемлема.

ГЛАВА X

КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И НЬЮТОНОВСКИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

При обсуждении аморфного математического пространства мы упомянули, что положение и, следовательно, движение не могут иметь иного значения, кроме как выражения условий по отношению к какой-либо конкретной системе отсчета. Короче говоря, необходимо придерживаться визуального принципа относительности.

Соответственно, мы выберем произвольную систему отсчета, которую будем считать определенной тремя взаимно перпендикулярными плоскостями, пересекающимися в общей точке O . Мгновенное положение тела будет отныне определяться после измерения жесткими стержнями его расстояний от трех плоскостей нашей системы отсчета; и единственным типом положения и движения тела, который мы можем определить однозначно, будет его положение и движение относительно нашей системы отсчета.

Для измерения скорости тела относительно нашей системы отсчета необходимо добавить часы. Мы будем считать, что эти часы отбивают равные промежутки времени, где равенство, конечно, определяется требованиями практического равенства времени, то есть биением какого-либо изолированного периодического механизма.

Теперь совершенно очевидно, что, если не относиться к какой-либо конкретной системе отсчета, путь, пройденный телом, и его движение по этому пути не могут иметь определенного значения. Так, если в равномерно движущемся поезде мы бросим мяч в воздух и снова поймем его руками, то по отношению к поезду мяч будет двигаться вверх и вниз по одной и той же вертикали; с другой стороны, по отношению к насыпи мяч будет описывать параболу. Опять же, если камень падает с большой высоты, его движение относительно Земли будет ускоряться, тогда как относительно системы отсчета, падающей вместе с камнем, он будет оставаться в покое.

Таким образом, представляется, что мы можем придать траектории движения тела любую произвольную форму, какую пожелаем; для этого нам нужно лишь выбрать подходящую систему отсчета. Та же неопределенность, конечно, применима и к движению тела по его траектории. Таким образом, форма траектории в пространстве (прямолинейная или кривая) или вид движения (равномерное или ускоренное) не могут иметь абсолютного значения. С точки зрения математического пространства все это будет в основном относительно выбранной нами системы отсчета.

Но очевидно, что такая позиция, к которой нас вынуждает наше понимание математического пространства, предполагает, что все системы отсчета, которые мы можем выбрать, находятся в одинаковом положении, то есть неотличимы друг от друга. Галилей и Ньютон заметили, что это не так. В некоторых системах отсчета нас тянуло то в одну, то в другую сторону странными силами, распределенными несимметрично, и предметы, положенные на пол, не оставались на том месте, где их положили. Пространство вокруг нас казалось хаотичным, как, например, на вращающемся диске или в поезде, проходящем поворот. В других системах отсчета таких сил не было (за исключением силы тяжести), и пространство казалось неподвижным и спокойным, одинаковым везде. Последние системы отсчета называются **галилеевыми или инерциальными**.

Однако галилеева система координат не являлась единственной. Насколько могли определить самые точные механические эксперименты, существовало неопределенное количество таких систем, все из которых двигались относительно друг друга с различными постоянными скоростями по прямым линиям, не подвергаясь какому-либо относительному вращению во время своего движения. Механические эксперименты, проведенные в любой из этих галилеевых систем отсчета, показали, что свободные тела движутся по прямым линиям с постоянной скоростью (закон инерции Ньютона), и при отнесении к этим системам отсчета механические явления, включая движения планет, можно было описать с помощью очень простых законов. С точки зрения галилеевых систем отсчета, другие системы отсчета, не галилеевы (те, которые наполнены странными силами), оказывались движущимися с ускоренными или вращательными движениями.

Механические эксперименты, проведенные в негалилеевых системах отсчета, доказали, что расположение странных несимметричных так называемых **инерционных** сил имело тесную связь с кажущимися движениями этих систем отсчета, если смотреть с галилеевых систем. Таким образом, экспериментатор, находящийся в одной из этих странных систем отсчета, мог, не глядя наружу, точно предсказать, как его система отсчета будет выглядеть с точки зрения галилеева наблюдателя (*т. е.* наблюдателя в галилеевой системе отсчета), по крайней мере в том, что касается ускорения и вращения. Таким образом, в негалилеевой системе отсчета, движущейся по отношению к галилеевой системе отсчета по прямой линии с определенным ускорением, силы инерции будут располагаться параллельно, тянущие в направлении, противоположном направлению относительного ускорения. В негалилеевой системе отсчета, вращающейся по отношению к галилеевому наблюдателю, расположение инерционных сил будет гораздо более сложным. Будет действовать **центробежная сила**, тянущая наружу, и так называемые **силы Кориолиса**, тянущие в стороны.

С точки зрения всех этих негалилеевых систем отсчета законы механики казались бы безнадежно сложными. Свободные тела больше не двигались бы по прямой линии с постоянной скоростью, а описывали бы причудливые кривые с переменной скоростью. Закон всемирного тяготения Ньютона больше не объяснял бы движения планет, наблюдаемое из этих систем отсчета, и изучение механики представляло бы огромные трудности. Короче говоря, все простые законы, наблюдаемые из галилеевых систем отсчета, пришлось бы усложнять учетом воздействия этих странных инерционных сил, когда мы хотели сформулировать законы, управляющие явлениями, наблюдаемыми из негалилеевых систем отсчета.

Поэтому неудивительно, что классическая наука выбрала галилеевы системы отсчета в качестве стандартных. Все законы механики и физики были отнесены к ним, и это, по сути, было сутью открытия Коперника. Кстати, мы видим, что у нас есть еще одно определение галилеевой системы отсчета: мы можем сказать, что галилеева система отсчета — это система, в отношении которой верны законы классической механики (закон инерции, закон Ньютона и т. д.).

Можно также упомянуть, что сама возможность существования определенных законов механики, таких как закон инерции, зависит от наличия определенных фундаментальных различий между различными системами отсчета. Если бы все системы отсчета были идентичны, как того требует полная относительность движения, закон инерции не выражал бы ничего. В каждом случае мы могли бы сделать движение тела таким, каким мы хотим, выбрав подходящую систему отсчета; и если бы у нас не было средств отличить одну систему отсчета от другой, прямая траектория тела в пустом пространстве не имела бы никакого физического значения.

Теперь мы можем дать еще одно определение галилеевой системы отсчета. Из закона инерции, согласно которому свободные тела, если смотреть на них из галилеевых систем отсчета, будут описывать прямые линии с постоянной скоростью, следует, что звезды, будучи, по-видимому, свободными телами, будут подчиняться этому закону и, ввиду своей удаленности, будут казаться подверженными очень небольшим смещениям даже в течение столетия. Этот факт привел к более легко получаемому определению галилеевой или инерциальной системы отсчета, а именно системы отсчета, по отношению к которой звезды будут казаться неподвижными. Это определение не призвано заменить ранее данное определение системы отсчета, в которой не действуют силы инерции, поскольку теоретически оба определения эквивалентны. Его единственное преимущество заключается в том, что оно приводит к более точному эмпирическому определению галилеевой системы отсчета и сразу показывает нам, что наша Земля не является такой системой отсчета, поскольку звезды кажутся вращающимися вокруг Полярной звезды. С точки зрения истинной галилеевой системы отсчета, наша Земля, таким образом, вращается вокруг полярной оси каждые двадцать четыре часа.

Если бы мы пытались распознать негалилееву природу системы отсчета Земли, стремясь обнаружить следы инерционных, центробежных и кориолисовых сил, эта задача была бы более сложной из-за незначительности этих сил. Тем не менее, эти силы были обнаружены, и они объясняют выпуклость экватора, движение циклонов по часовой стрелке и против часовой стрелки, вращение плоскости маятника Фуко, направления пассатов и океанских течений и т. д.

До сих пор мы не пытались сделать какие-либо общие выводы из существования этих различных систем отсчета. Мы лишь констатировали, что они, несомненно, существуют, поскольку были обнаружены в ходе экспериментов, и что проще отнести законы физики, и в частности законы механики, к галилеевой или инерциальной системам отсчета. Когда речь заходит об интерпретации более глубокого значения всех этих фактов, возникают различные альтернативы, и в этой главе мы подробно обсудим решение Ньютона.

Проблема заключается в том, чтобы определить: «Почему существуют разные типы систем отсчета, если наше понимание аморфного математического пространства, казалось бы, исключает любые такие различия?» Здесь мы можем сделать одно из двух предположений. Либо мы можем предположить, что различия в условиях, существующих в различных системах отсчета (различия, которые иллюстрируются различным распределением инерционных сил или, наоборот, их полным отсутствием), являются внутренними, либо мы можем предположить, что они обусловлены внешними влияниями. Ньютон принял первую альтернативу, Мах и Нойман — вторую.

Если мы следуем Ньютону, мы должны предположить, что особенности, существующие в наших системах отсчета, не могут быть отнесены к причинам, существующим за их пределами. Поэтому мы можем предположить, что инерционные силы были бы точно такими же, если бы равновесие во Вселенной было уничтожено, так что для всех целей и задач мы могли бы считать наши системы отсчета изолированными от всех внешних воздействий. Мы предполагаем, что различные распределения инерционных сил, проявляющиеся в наших различных системах отсчета, должны быть отнесены к условиям покоя и движения этих систем, не по отношению к остальной части Вселенной, которая была бы практически уничтожена, а по отношению к тем ограниченным частям эфира или пространства, в которых находятся эти системы.

Таким образом, Ньютон объективирует пространство и, благодаря симметричным условиям, которые сохраняются в галилеевых системах отсчета, предполагает, что

последние находятся в покое в пространстве, в то время как негалилеевы системы отсчета считаются ускоренными или вращающимися. Если же мы помним, что существует строгое соответствие между центробежным и кориолисовым распределением сил в негалилеевой системе отсчета и ее скоростью вращения, наблюдаемой из галилеевой системы, то мы можем предположить, что пространство, в котором галилеева система отсчета находится в покое, является также пространством, в котором негалилеева система отсчета ускоряется или вращается. Таким образом, существует только одно пространство, абсолютное пространство, по отношению к которому движение и покой имеют физическое значение. Галилеевы системы отсчета — это системы, которые не ускоряются; негалилеевы системы — это системы, которые ускоряются или вращаются в этом абсолютном пространстве. Таково было решение Ньютона, и, если мы принимаем его постулат изоляции, то, по-видимому, нет никакого способа от него уйти.

В этих условиях закон инерции Ньютона, согласно которому свободное тело движется по прямой с постоянной скоростью по отношению к галилеевой системе отсчета, приобретает более определенное значение. Теперь этот закон подразумевает, что это движение описывается в абсолютном пространстве, то есть в пространстве, которое обладает определенной структурой и благодаря этому способно направлять тело по его прямолинейной траектории. Если бы пространство было полностью аморфным и относительным, как мы предполагали изначально, то не было бы ничего, что могло бы направлять тело; и даже если бы последнее обладало достаточным интеллектом, чтобы направлять себя само, в аморфном пространстве не было бы ничего, по чему оно могло бы ориентироваться.

Ряд философов подвергли критике ньютоновскую гипотезу об абсолютном движении и абсолютном пространстве. Например, некоторые из них заметили, что это так называемое абсолютное пространство вполне можно сравнить с пузырьком эфира, плавающим и вращающимся в более обширном пространстве, которое, в свою очередь, находится в еще более обширном пространстве, *и так до бесконечности*; таким образом, абсолютное вращение по Ньютону теряет смысл. Разумеется, аргументы такого рода совершенно не имеют отношения к позиции Ньютона и к науке в целом.

Классическая наука под абсолютным пространством понимала пространство, в отношении которого движение, или, во всяком случае, ускоренное движение и вращение, проявлялись динамически; и эксперимент окончательно доказал, что такое пространство существует. Не было смысла и, по сути, никакого смысла задаваться вопросом, следует ли представлять себе это абсолютное пространство как вращающееся в каком-то другом пространстве; ведь даже если бы гипотеза такого рода когда-либо была подтверждена, факт оставался бы фактом: вращение казалось абсолютным в определенном пространстве, независимо от того, было ли это пространство сверхпространством *par excellence*. Это было все, что подразумевалось под абсолютностью вращения с точки зрения науки. Короче говоря, как ясно понимали ученые, был только один способ опровергнуть абсолютное пространство и движение Ньютона, а именно отрицать его постулат изоляции. Именно такой курс и был избран Махом.

Если мы последуем за Махом и Нойманном и предположим, что различные внутренние динамические условия, которые отличают различные системы отсчета, обусловлены влияниями внешней природы, мы больше не сможем согласиться с выводами Ньютона, поскольку мы больше не сможем предположить, что если бы вся внешняя вселенная была уничтожена, внутренние условия в наших системах отсчета остались бы прежними. Отныне, приписывая появление центробежных и кориолисовых сил вращению тела, мы должны будем подразумевать, что это вращение было относительным по отношению к чему-то во

вселенной, что *не было* пустым пространством, в котором находилась система отсчета. Естественным выводом было то, что это вращение было относительным по отношению к другой форме существования, а именно к материи. Нейман предложил гипотезу о таинственном теле, названном «телом Альфа», динамическому воздействию которого он приписывал возникновение инерционных сил; но, как заметил Пуанкаре, «все, что мы можем знать об этом таинственном теле Альфа, — это его название». Гипотеза Неймана, которая не поддается проверке, сводится к простой метафизической спекуляции, не имеющей никакой научной ценности.

Мах принял гораздо более правдоподобную альтернативу. Он предположил, что вращение системы отсчета, которое, как казалось, сопровождало центробежные и кориолисовы силы, было вращением по отношению к остальной части физической вселенной, а значит, ко всей материи вселенной. Поскольку самое обширное скопление материи во Вселенной дается совокупностью масс звезд, мы приходим к выводам Маха, а именно, что силы инерции возникают из относительного вращения или ускорения системы отсчета по отношению к вселенной звезд. Если бы звезды были уничтожены, центробежная сила и все силы инерции исчезли бы, вращающаяся масса воды не разбрызгивалась бы по бокам ведра и т. д. Разумеется, едва ли стоит упоминать, что фактическая видимость звезд или наша способность просто представить их существование не имеют никакого отношения к этой проблеме; значимыми являются исключительно причинные влияния, производимые их массами и относительным ускорением.

На самом деле, между решениями Маха и Ньютона нет существенной разницы. Даже если мы следуем Маху, то, если мы не готовы верить в действие на расстоянии (), мы должны предположить, что влияние звезд может достигать нас только в результате распространения от места к месту через пространство. Мы вполне можем предположить, что в результате этого влияния пространство приобретает определенную структуру, так что в конечном итоге физическая реальность вращения все еще может быть отнесена к вращению в пространстве. Однако есть разница: для Ньютона эта структура пространства является неотъемлемой частью самого пространства и не имеет ничего общего с условным присутствием материи в целом, тогда как, если мы следуем за Махом, эта структура пространства должна рассматриваться как внешняя и вызванная материей Вселенной. В отсутствие материи структура пространства автоматически исчезла бы, и различные системы отсчета стали бы неразличимыми.

Как мы видим, взгляды Маха приводят к частичному оправданию визуального или кинематического принципа относительности. Но это оправдание является лишь частичным, поскольку во всех случаях относительность ускорения и вращения существует только между совокупностью звезд и телом, а не между любыми двумя произвольно выбранными телами, как в визуальном принципе.

Против решения Маха выступает аргумент, что звезды находятся слишком далеко, чтобы производить такие ощутимые эффекты, как разрыв вращающегося маховика или разбрызгивание вращающейся массы воды по бокам ведра. Но, что еще более важно, классической науке казалось невозможным объяснить эти динамические действия, приписываемые звездам. Тем не менее, благодаря огромному прогрессу в понимании природы, который дала нам общая теория относительности, идеи Маха становятся весьма вероятными, хотя и не полностью подтвержденными на данный момент. Астрономические наблюдения, проводимые на шаровых скоплениях, могут в конечном итоге решить эту проблему.

Вернёмся теперь к решению этой проблемы Ньютоном, поскольку оно является воплощением классической механики. Как мы видели, Ньютон, выдвинув свой постулат изоляции, сделал неизбежным веру в некую реальную абсолютную среду, пространство или эфир, из которых вращение и ускорение получали бы реальное значение. Но здесь мы должны вспомнить, что механические эксперименты, хотя и четко различали галилееву систему от негалилеевой, были совершенно неспособны различать одну галилееву систему от другой. Поэтому казалось невозможным обнаружить, какую конкретную галилееву систему следует считать находящейся в абсолютном покое в неподвижном абсолютном пространстве, а какие следует рассматривать как движущиеся в пространстве с равномерными поступательными движениями. Другими словами, когда мы ограничивались механическими экспериментами, скорость в пространстве была относительной, поскольку единственной скоростью, поддающейся механическому измерению, была относительная скорость, то есть скорость одной системы отсчета по отношению к другой. Ускорение и вращение, с другой стороны, были абсолютными и могли быть обнаружены и измерены механически без необходимости прибегать к галилеевой системе отсчета в качестве термина сравнения.

Если бы мы обратились к галилеевой системе отсчета, чтобы проверить наши вычисления, было бы совершенно безразлично, какую конкретную галилееву систему отсчета мы выбрали бы. По отношению к любой из этих галилеевых систем отсчета тело будет проявлять точно такое же ускорение и скорость вращения, тогда как его скорость, конечно же, будет варьировать в зависимости от галилеевой системы отсчета, к которой оно относится. Это и есть *абсолютный характер ускорения* в отличие от *относительного характера скорости*.

Конечно, даже ускоренное тело можно было бы представить как находящееся в покое или движущееся с равномерным движением, если бы мы выбрали подходящую систему отсчета. Но для обеспечения такого результата система отсчета должна быть негалилеевой или ускоренной, а мы видели, что негалилеевые системы отсчета никогда (по крайней мере, на данном этапе) не могут рассматриваться как находящиеся в покое в пространстве. Отсюда следует, что движение тела относительно любой из этих негалилеевых систем отсчета никогда не может считаться представительным для реального движения тела в пространстве.

Принцип относительности классической науки лишь обобщает эти открытия, утверждая, что **наблюдатель, находящийся в галилеевой системе отсчета, не может с помощью какого-либо механического эксперимента установить, находится ли он в покое в пространстве или в состоянии равномерного поступательного движения**. Простая иллюстрация прояснит смысл этих утверждений.

Рассмотрим поезд, движущийся с постоянной скоростью по прямой траектории; очевидно, что в движении поезда нет никаких признаков ускорения, поскольку внутри него не ощущаются силы инерции. В обычной практике мы говорим, что поезд имеет определенную скорость, равную столько-то миль в секунду. Но если мы задумаемся, то увидим, что эта постоянная скорость рассчитывается относительно поверхности Земли, которая считается галилеевой системой отсчета. Если бы Земля внезапно стала невидимой, у нас не было бы физических средств для определения точной скорости поезда в пространстве. Но предположим, что поезд замедляется, ускоряется или проходит поворот. В этом случае, даже если Земля была бы невидимой, поезд все равно обладал бы в каждый момент определенным ускорением, и это ускорение все равно было бы ощутимо и измерялось бы силами инерции, тянущими и толкающими пассажиров в поезде. Таким образом, мы видим, что ускорение существует *само по себе* и, в отличие от скорости, оно

определено даже в отсутствие системы отсчета. Теперь из классического принципа относительности следует, что, поскольку абсолютная скорость не имеет смысла (по крайней мере, в механике), единственный тип равномерного поступательного движения, который может быть обнаружен механическими средствами, сводится к относительному равномерному поступательному движению материи по отношению к материи, то есть движению по отношению к чему-то наблюдаемому. Величина этого относительного движения зависит в основном от выбранной нами галилеевой системы отсчета.

Относительное равномерное поступательное движение, конечно, можно обнаружить визуально, но его можно обнаружить и рядом других способов. Так, относительное движение лезвия бритвы по ремню для заточки вызывает нагрев вследствие трения. Относительное смещение ножа между двумя полюсами электромагнита вызывает индуцированные токи, которые проявляются в затруднении прорезания линий силы поля. Относительное движение накаливаемого атома вызывает сдвиг спектральных линий (эффект Доплера), и именно благодаря этому сдвигу астрономы могут определять радиальные скорости звезд по отношению к Земле. Другими словами, хотя абсолютная скорость никогда не может быть обнаружена с помощью механических экспериментов и поэтому не имеет смысла в механике, относительная скорость материи по отношению к материи *может* быть обнаружена несколькими способами; таким образом, этот относительный тип скорости является единственным, который имеет какое-либо физическое значение, или, по крайней мере, какое-либо механическое значение.

Теперь мы должны рассмотреть ряд трудностей, возникающих из концепции абсолютного пространства Ньютона. Во-первых, хотя Ньютон постулировал абсолютное пространство и движение, оставался факт, что из всех абсолютных движений только абсолютное ускорение и вращение когда-либо были обнаружены, по крайней мере, механическими средствами. Казалось странным, что если абсолютная скорость имеет значение, как это и должно быть, если пространство является абсолютным, то она так упорно отказывается раскрыть себя. Мы не могли утверждать, что наша неспособность обнаружить, какая из галилеевых систем координат действительно находится в покое, была связана с несовершенством наших механических экспериментов, поскольку в таком случае вся структура ньютоновской механики рухнула бы, если бы такое предположение оказалось верным.

Причина такого утверждения легко понятна. Основной закон ньютоновской механики гласит, что сила, действующая на тело, равна массе тела (неизменной величине), умноженной на ускорение. Теперь, ускорение тела, рассчитанное в любой галилеевой системе отсчета, всегда одинаково, поскольку различные галилеевы системы отсчета различаются только своей скоростью в абсолютном пространстве, а скорость, прибавленная к ускорению или вычтенная из него, никогда не может изменить ускорение. Поскольку масса тела является инвариантом согласно классической механике, сила также должна измеряться одинаково во всех галилеевых системах отсчета. Другими словами, для классической науки было важно, чтобы фундаментальный закон механики оставался одинаковым во всех галилеевых системах отсчета, и аналогичные выводы должны были бы применяться ко всем механическим законам. Но тогда ни один механический эксперимент, каким бы точным он ни был, проведенный в одной или другой галилеевой системе отсчета, не мог бы дать разных результатов, так что абсолютная скорость никогда не могла бы быть известна. Короче говоря, если бы ньютоновская наука осталась в силе, то неудача механических экспериментов по обнаружению абсолютной скорости нашей галилеевой системы отсчета в пространстве никогда не могла бы быть объяснена их недостаточной

точностью, поскольку любые положительные результаты разрушили бы всю структуру ньютоновской динамики.

Итак, здесь была абсолютная скорость, которая была реальностью, поскольку пространство было абсолютным, но которая ни в коем случае не могла проявиться!

Конечно, можно было предположить, что пространство имеет двойственную структуру, частично абсолютную и частично относительную; абсолютную для вращения и ускорения, но относительную для скорости. Но эту внутреннюю двойственность в природе пространства и движения было трудно принять; казалось, что пространство и движение должны быть либо одним, либо другим: либо полностью абсолютными, либо полностью относительными. Кроме того, было чрезвычайно трудно представить себе двойственность в структуре пространства, поэтому вся ситуация была весьма загадочной.

Однако был возможный выход из этой затруднительной ситуации, а именно утверждение, что абсолютная скорость была реальной, вполне реальной, и что ее вполне можно было обнаружить, если бы мы обратились к другим типам физических экспериментов — например, к электродинамическим и оптическим экспериментам, а не только к механическим. Но мы увидим, что точные эксперименты с тех пор доказали, что эти ожидания также были обречены на разочарование; поэтому стало совершенно ясно, что никакие эксперименты, механические, оптические или электродинамические, никогда не позволят обнаружить эту неуловимую абсолютную скорость.

Даже если бы оптические и электромагнитные эксперименты позволили обнаружить абсолютную скорость, все равно не все было бы так просто. Всегда можно было бы утверждать, что обнаруженная таким образом абсолютная скорость — это не абсолютная скорость в пространстве, а скорость в эфире, плавающем в пространстве. Но мы можем отметить, что это последнее возражение имеет очень мало веса. По причинам, которые мы объясним в следующей главе, не представляется правомерным отделять эфир от пространства. Если бы оптические эксперименты обнаружили скорость через эфир, нам пришлось бы предположить, что они также раскрыли долгожданную абсолютную скорость через пространство; и ньютоновская вера в абсолютное пространство была бы значительно укреплена.

Однако нет необходимости заикливаться на том, что могло бы произойти, поскольку оптические и электромагнитные эксперименты не выявили ни малейших следов абсолютной скорости. Соответственно, мы приходим к **специальному принципу относительности Эйнштейна**, который гласит, что не только механически, но и во всех отношениях абсолютная скорость в пространстве должна ускользать от эмпирического обнаружения. В этих условиях, если мы не хотим сохранить в науке абсолютную скорость, которую никогда нельзя обнаружить и которая поэтому остается догадкой, нет иного выхода, как заявить, что пространство вместе с его эфиром имеет двойственную структуру: относительную для скорости и абсолютную для ускорения. Эйнштейн, похоже, вернул нас к чрезвычайно сложной задаче осмысления этой двойственной природы пространства. Но решение этой конкретной проблемы появилось, как только Минковский открыл пространство-время. С четырехмерным пространством-временем причина двойственности становится очевидной; ведь абсолютность пространства-времени (как будет объяснено в одной из следующих глав) объясняет относительность скорости и абсолютность ускорения.

Таким образом, в теории Эйнштейна, по крайней мере в ее первоначальной форме, скорость остается относительной, а ускорение — абсолютным, как и в классической науке,^{[\[37\]](#)} с той лишь разницей, что относительность скорости теперь более полная, поскольку она применима ко всем видам экспериментов, а не только к механическим. Только когда мы

рассматриваем более спекулятивную часть теории, относящуюся к форме Вселенной, происходит полная релятивизация всего движения в маховском смысле. Тогда пространство-время оказывается уже не абсолютным, существующим *само по себе*, а полностью обусловленным материей Вселенной. Однако, как мы уже упоминали, эта часть теории все еще носит высоко спекулятивный характер, и во избежание ненужной путаницы мы настоятельно рекомендуем читателю полностью исключить ее из своего сознания до тех пор, пока он не приобретет надлежащее понимание специальной и первой части общей теории. Соответственно, мы пока проигнорируем ее и можем утверждать, что в теории Эйнштейна движение обладает двойственной природой, как и в классической науке.

ГЛАВА XI

ЭФИР

Классическая наука предполагала, что явления, которые мы называем электричеством, магнетизмом и светом, являются ни чем иным, как деформациями, сжатиями и волновыми движениями в невесомой среде, неподвижном эфире, плавающем в пространстве. Это убеждение не было полностью слепым догадкой. Учитывая напряжения и деформации, которые явно окружали заряженные тела, электрические токи и магниты, а также учитывая хорошо известную волновые свойства распространения света, необходимо было постулировать существование некой среды, чтобы придать этим напряжениям, деформациям и волнам физическое значение. О самом этом загадочном эфире практически ничего не было известно, но из той скудной информации, которую удалось собрать, он, по-видимому, обладал странными и противоречивыми свойствами.

Его сопротивление движению было практически нулевым — гораздо меньшим, чем у газа, такого как атмосфера; поскольку трение, вызванное атмосферой, достаточно для того, чтобы метеориты стали раскаленными, в то время как в тех областях пространства, заполненных эфиром, которые простираются за пределы атмосферы, такого эффекта не наблюдалось. Кроме того, если бы движение через эфир вызывало трение, то на механические явления должна была бы влиять скорость нашей галилеевой системы отсчета через пространство и, следовательно, через эфир; но, насколько можно было судить по экспериментам, такого влияния никогда не обнаруживали. (В этом и заключалась суть ньютоновского принципа относительности.) Поэтому казалось, что эфир должен быть сходен с каким-то сверхразреженным газом. С другой стороны, поперечные колебания световых волн были совместимы только с существованием жесткой среды; но между свойствами жесткости и крайней разреженности существовало очевидное противоречие. Однако, каким бы непонятным и искусственным ни казался эфир, его было чрезвычайно трудно исключить из науки из-за огромного количества экспериментальных данных, которые, казалось, подтверждали его существование.

В любом случае, как только было признано существование полуматериального эфира, было естественно предположить, что движение наших оптических и электрических приборов через его субстанцию должно оказывать заметное влияние на результаты экспериментов. Так же как скорость ветра добавляется к скорости звуковых волн, распространяющихся в атмосфере, так и с учетом нашего понимания световых волн и электрических явлений было логично предположить, что эфирный ветер должен нести с собой световые волны и эфирные деформации. Оптические и электрические эксперименты, проведенные с достаточной точностью, должны были бы, следовательно, быть способны обнаружить скорость нашей планеты через эфир; так что, в отличие от относительности галилеева движения для механических явлений, к которым эфир не имел отношения, галилеево движение было бы чем угодно, только не относительным, если бы были предприняты электромагнитные или оптические эксперименты.

Теперь эта двойственность, которая, как предполагалось, существовала в природе галилеева движения или скорости, делая его относительным для механических явлений и абсолютным для электродинамических, была вполне приемлема, при условии, что было допустимо проводить четкое различие между механикой и электродинамикой, между

пространством и эфиром. Но вся тенденция недавних исследований заключалась в том, чтобы показать, что это различие было неоправданным. Во-первых, материя, по-видимому, состояла из электронов и протонов, а значит, сводилась к явлениям электромагнитной природы. Во-вторых, было известно, что электромагнитные явления развивают механические силы. Где же тогда заключалось существенное различие между механическими и электромагнитными явлениями? Как в таких условиях можно было объяснить эту предполагаемую двойственность в ощутимых эффектах, вызываемых скоростью движения через эфир, относительной или физически бессмысленной для механических экспериментов, но способной производить физические эффекты в электромагнитных?

Казалось, что механические и электромагнитные явления должны быть поставлены на одну ступень. Тогда нам пришлось бы предположить, что механические явления вместе с электромагнитными подвергаются воздействию скорости движения через эфир, а значит, через пространство, или же признать, что ни электродинамические, ни механические явления никогда не могут подвергаться воздействию этого типа движения. Если мы примем первую гипотезу, то ньютоновский или механический принцип относительности будет опровергнут, а вместе с ним и вся структура ньютоновской механики; а если мы примем вторую гипотезу, то наше понимание электромагнитных процессов и эфира должно будет быть глубоко изменено. В любом случае, независимо от того, удалось ли электромагнитным и оптическим экспериментам обнаружить абсолютное галилеево движение, наука, казалось, оказалась в затруднительном положении.

Классические физики придерживались мнения, что оптические и электромагнитные эксперименты обязательно выявят абсолютное галилеево движение, и их не беспокоил тот факт, что в результате этого, возможно, придется отказаться от ньютоновской механики. Действительно, сомнения в достоверности ньютоновской механики уже возникли, когда Кауфманн и Бухерер показали, что электроны, движущиеся с очень большой скоростью, как будто увеличивают свою массу — явление, которое, конечно, было несовместимо с ньютоновским убеждением в неизменности массы, если только не прибегнуть к какой-то *специальной* гипотезе. Правда, очень точный тест, проведенный Майкельсоном в 1887 году, не смог обнаружить какого-либо влияния абсолютного галилеева движения в определенном оптическом эксперименте; но всегда предполагалось, что объяснение этой неудачи рано или поздно будет найдено, и что другие эксперименты будут успешными там, где эксперимент Майкельсона потерпел неудачу. Поэтому, когда Эйнштейн предложил в качестве принципа природы, что, независимо от того, является ли эфир необходимой гипотезой, галилеево движение через эфир или через пространство никогда не будет обнаружено ни одним типом эксперимента, будь то оптическим, электромагнитным или механическим, большинство физиков не обратили особого внимания на новую доктрину.

Не следует думать, что эта враждебность классических физиков к теории Эйнштейна на ее начальных этапах была обусловлена исключительно их верой в абсолютную и объективную природу, которую, как казалось, неизбежно было приписывать эфиру. Она была обусловлена и другими причинами, которые мы сейчас и рассмотрим.

С математической точки зрения, физическое явление сводится к систематическому изменению интенсивности и ориентации ряда величин от места к месту и от времени к времени. Физическое явление, относящееся к некоторой произвольной системе отсчета, может поэтому быть выражено математическими уравнениями, в которых пространственные и временные координаты относительно системы отсчета фигурируют в качестве переменных. Теперь фундаментальная проблема теоретической физики состоит в том, чтобы определить, как уравнение явления, относящегося к системе отсчета B , которая

движется относительно системы отсчета A , может быть получено из его уравнения, относящегося к системе отсчета A , чисто математическими средствами, без дальнейшего обращения к эксперименту. Решение этой проблемы позволило бы нам предсказать изменение внешнего вида явления при наблюдении сначала из системы отсчета A , а затем из системы отсчета B . Очевидно, что над уравнением, относящимся к A , необходимо будет выполнить некоторую математическую операцию. Эта операция называется **математическим преобразованием**, а уравнение, над которым она выполняется, считается преобразованным. В рассматриваемом нами типе задачи, где одна система отсчета следует за другой, преобразование будет касаться пространственных и временных переменных или координат, присутствующих в уравнении; и преобразования такого характера называются **пространственными и временными преобразованиями**. Таким образом, вся задача сводится к обнаружению тех пространственных и временных преобразований, которые действуют в нашем мире. Эти преобразования невозможно угадать *априори*, и изучение поведения физических явлений является необходимым условием для их определения. Поскольку все эксперименты, известные классической науке, подтверждали впечатление, что расстояние в пространстве и продолжительность во времени являются абсолютными величинами, остающимися неизменными при смене системы отсчета, то, естественно, следовал определенный вид преобразований пространства и времени.

Рассмотрим, например, поезд, движущийся с постоянной скоростью по насыпи. Если в движущемся поезде в любой момент времени, скажем, в два часа, происходит какое-либо событие, то это событие, очевидно, произойдет точно в тот же момент (в два часа) по отношению к насыпи, поскольку время считается абсолютным, одинаковым для всех. Другими словами, время и продолжительность для наблюдателя в движущемся поезде во всех отношениях идентичны времени и продолжительности для наблюдателя на набережной. Этот факт выражается формулой $t' = t$, где t' — время для поезда, t — время для набережной.

Теперь предположим, что по движущемуся поезду катится мяч со скоростью u , и предположим, что из-за движения поезда наблюдатель в поезде проходит мимо наблюдателя на насыпи в момент времени, когда часы показывают полдень. Если мяч покидает наблюдателя в поезде именно в этот момент времени, его расстояние от наблюдателя в поезде в момент времени t' ($m. e. t'$ секунд после полудня) будет равно $x' = ut' - ut$ (поскольку t' и t идентичны). Но тогда его расстояние от наблюдателя на набережной будет равно сумме расстояния между двумя наблюдателями и расстояния ut , которое мы только что выразили (расстояния являются абсолютными). Таким образом, оно будет равно $x = x' + vt'$ (где v — скорость поезда вдоль набережной).^[138] Это последнее выведение очевидно, если мы предположим, что расстояние — это абсолютное понятие, которое будет одинаковым независимо от того, измеряет ли его один наблюдатель или другой, и именно такое предположение всегда делала классическая наука. Короче говоря, зная точку x' , в которой происходит событие в данный момент времени по отношению к поезду, мы можем сразу вычислить точку, в которой происходит то же событие по отношению к насыпи. Все, что нам нужно сделать, это заменить x' на $x' + vt'$, и дело сделано.

Эти преобразования пространства и времени, позволяющие нам переходить от одной галилеевой системы отсчета к другой, были знаменитыми **галилеевыми преобразованиями** классической науки и, как мы видели, были необходимым следствием нашей веры в абсолютную продолжительность и расстояние. Они были заданы следующим образом:

$$x = x' + vt'; \quad t = t';$$

или, опять же,

$$x' = x - vt; \quad t' = t.$$

Применяя их к конкретным задачам, *например*, к изменению формы траектории падающего тела, наблюдаемого последовательно из движущегося поезда и с насыпи, или к изменению цвета монохроматического источника света, или к изменению высоты музыкальной ноты, ожидания, связанные с преобразованиями, всегда подтверждались с точностью, соответствующей точности наших экспериментов. Подтверждения такого рода, среди прочих, считались доказательством правильности преобразований, а значит, и нашей традиционной веры в абсолютность продолжительности и расстояния.

Теперь, если вместо того, чтобы ограничиваться каким-либо конкретным явлением, мы рассмотрим все явления одного и того же типа, такие как все механические или все электродинамические явления, мы знаем, что эти явления в совокупности удовлетворяют требованиям определенных общих законов или уравнений: законов механики или законов электродинамики, в зависимости от случая. Следовательно, сказать, что движение или скорость по Галилею относительны в отношении определенного типа явлений, означает, что общие законы, управляющие такими типами явлений, остаются неизменными в форме, когда мы переходим от одной системы отсчета по Галилею к другой. Математически это означает, что когда преобразования пространства и времени применяются к общим законам, эти законы или уравнения преобразуются в уравнения, обладающие точно таким же математическим видом; тогда говорят, что они преобразованы в самих себя.

Когда преобразования были применены к общим законам механики, эти законы не претерпели никаких изменений в форме; и этот факт стал математическим выражением ньютоновского или механического принципа относительности галилеева движения. Но когда преобразования были применены к уравнениям или законам электродинамики, было отмечено явное изменение в форме; законы или уравнения утратили свой простой вид. Это позволяло предположить, что электродинамические законы, принятые классической наукой, действовали в своей простой форме только для привилегированной галилеевой системы отсчета, которая по соображениям симметрии естественным образом предполагалась неподвижной в неподвижном эфире. Но тогда, поскольку законы изменяли свою форму в зависимости от галилеевой системы отсчета, к которой они относились, из этого следовало, что электромагнитные эксперименты должны были идти по разному пути и давать разные результаты в зависимости от системы отсчета, в которой находились наблюдатель и его инструменты. Тогда должно было бы быть возможно обнаружить величину скорости системы отсчета через эфир с помощью электромагнитных или оптических экспериментов, так что вновь, независимо от какой-либо конкретной гипотезы об эфире, математическое рассуждение, а также обычное рассуждение подтвердили физическую реальность скорости через эфир.

Конечно, эти математические предположения зависели от двух гипотез: во-первых, что классические формулы преобразования, основанные на абсолютном расстоянии и продолжительности, были точными; и, во-вторых, что уравнения или законы электродинамики были правильными. Ставить под сомнение первое предположение казалось неоправданным, а ставить под сомнение правильность математического

выражения законов приводило к противоречию с экспериментом. Конечно, мы могли бы модифицировать законы электродинамики (устранив те математические термины, которые были причиной их изменчивости), сделав их таким образом инвариантными при галилеевых преобразованиях, но эти термины оказались ответственными за явление электромагнитной индукции. Их устранение было бы равносильно отрицанию существования индукции, а значит, и беспроводной связи, радио, динамо-машин и распространения света. Очевидно, что такое решение было неприемлемо, поскольку существование динамо-машин и т. д. было известно.

Учитывая все эти факты, ученые не имели ни малейшего сомнения в том, что достаточно точные эксперименты позволят нам определить скорость наших приборов, а значит, и нашей планеты, в неподвижном эфире.

Теперь мы должны перейти к краткому обзору так называемых отрицательных экспериментов, которые в первую очередь были причиной всех проблем. Давайте еще раз вспомним суть вопроса. Мы хотим выяснить, в какой степени скорость нашей галилеевой системы относительно эфира способна изменить результаты наших электромагнитных и оптических экспериментов.

В первую очередь среди этих испытаний мы должны упомянуть хорошо известное явление астрономической аберрации, согласно которому направление падения луча звездного света ежегодно изменяется по мере того, как Земля обращается вокруг Солнца. Очевидной аналогией этого явления является наклонное направление, которое принимают капли дождя на стекле окна движущегося поезда, которые наблюдателю, стоящему на набережной, кажутся падающими вертикально. Эта аналогия может подтолкнуть нас к предположению, что, поскольку наклон капель дождя на стекле позволяет нам вычислить скорость нашего поезда в неподвижной атмосфере, то теперь наклон луча звездного света, обусловленный движением Земли, должен дать нам нашу скорость в неподвижном эфире. Но этот вывод был бы ошибочным, поскольку, если мы задумаемся, то поймем, что мы смогли определить наше движение в атмосфере только потому, что у нас были основания предположить, что, если бы наш поезд стоял неподвижно в атмосфере, капли дождя казались бы падающими вертикально. Но в случае астрономической аберрации у нас нет возможности основывать наши выводы на какой-либо подобной предварительной информации. Мы не можем сказать, из каких направлений, по-видимому, исходили бы лучи звездного света, если бы мы находились в состоянии покоя в эфире, поскольку мы не знаем истинного положения звезд. Итак, все, что может дать нам астрономическая аберрация, — это годовое *изменение* нашей скорости в эфире, а значит, и нашей скорости относительно Солнца. ⁽¹³⁹¹⁾ Короче говоря, астрономическая аберрация не позволяет нам определить нашу абсолютную скорость в эфире, и мы должны полагаться на другие средства.

Во всех экспериментах, о которых мы будем упоминать, скорость движения через эфир, которую мы будем пытаться определить, будет скоростью нашей Земли; поскольку мы привязаны к поверхности Земли, это будет скорость, которую мы сможем определить лучше всего. К сожалению, Земля не является подлинно галилеевой системой отсчета из-за своего ускорения или вращения вокруг своей оси. Однако это ускорение точек на поверхности Земли очень мало, и центробежная сила, которую оно вызывает, едва заметна. Расчеты показывают, что, по крайней мере в первом приближении, в отношении оптических и электромагнитных экспериментов мы можем рассматривать систему, привязанную к Земле, как галилееву систему, обладающую скоростью, но не ускорением. Тем не менее это утверждение не совсем верно. Можно разработать эксперименты как в механике, так и в оптике, которые бы выявили ускорение или вращение Земли. Конечно, это вполне

естественно, поскольку *ускорение*, в отличие от *скорости* в пространстве, как известно, является абсолютным.

Для правильного понимания теории Эйнштейна необходимо полностью понять этот момент, поэтому просим прощения за то, что мы еще раз повторяем, что в настоящее время нас интересует только решение вопроса об относительности или абсолютности скорости или галилеева движения через эфир. В случае Земли нет опасности спутать возможные эффекты ускорения с эффектами, вызванными скоростью, поскольку из-за относительной медленности вращения Земли любые эффекты, которые могут возникнуть в результате ускорения, в любом случае будут гораздо слабее, чем эффекты, возникающие в результате скорости движения через эфир.

Подводя итог, можно сказать, что над Землей, должно быть, дует настоящий эфирный ураган, меняющийся как по интенсивности, так и по направлению в разных точках земной поверхности, а также в разное время суток и года. Именно этот эфирный ураган или эфирный дрейф мы и должны обнаружить. Однако все эксперименты, как оптические, так и электрические, упорно отказывались обнаружить малейшие следы этого эфирного дрейфа, так что было очевидно одно из двух. Либо дрейфа не было, либо, если дрейф и был, он был полностью скрыт компенсирующими явлениями, о которых пока ничего не было известно. Стокс принял первый вариант и предположил, что Земля в своем движении вокруг Солнца, возможно, увлекает за собой эфир, по крайней мере, в непосредственной близости от себя. Отсюда следовало бы, что на поверхности Земли никогда не может быть дрейфа, и все отрицательные эксперименты, которые не смогли обнаружить дрейф, были бы объяснены. Очевидным возражением против гипотезы Стокса было существование астрономической аберрации, которая, казалось, предполагала, что Земля движется через неподвижный эфир. Однако Стоукс математически доказал, что аберрация не является аргументом против его гипотезы, что это явление все равно будет иметь место, если движение Земли не вызывает водоворотов в конвективном эфире.

В дополнение к ряду других трудностей, которые будут объяснены вкратце, можно упомянуть, что для того, чтобы движение эфира соответствовало требованиям Стоукса, а значит, наблюдаемому явлению астрономической аберрации, расчеты доказали, что эфир не может быть несжимаемым. Фактически, Планк показал, что на поверхности Земли эфир должен быть в 60 000 раз плотнее и, следовательно, более сжимаемым, чем в отдаленных областях; и действительно, было бы странно, если бы это значительное увеличение плотности эфира не проявлялось при сравнении результатов оптических экспериментов, проведенных на вершине высокой горы и на уровне моря. Кроме того, поскольку колебания света являются поперечными, гипотеза о жестком эфире казалась неизбежной, пока мы хотели представлять себе свет как результат колебаний в эфире. И здесь снова теория Стоукса-Планка была трудноприемлемой.

Лодж попытался подвергнуть гипотезу Стокса непосредственному экспериментальному тестированию. Он утверждал, что если Земля способна увлекать эфир за собой в своем движении, то то же самое должно быть верно и для других движущихся тел. Но когда он исследовал этот предполагаемый эффект увлечения в случае быстро вращающихся стальных дисков, он обнаружил, что его нет.

Даже если мы проигнорируем эти противоречия и предположим, что земная атмосфера способна увлекать эфир за собой, нас ждет новая серия трудностей. Полное увлечение такого рода было бы несовместимо с общим явлением, предсказанным Френелем (Fresnel) и подтвержденным Физо (), согласно которому движущиеся диэлектрики (непроводители электричества), такие как вода, стекло и воздух, увлекают эфир за собой только частично;

процент увлечения увеличивается с увеличением рефракции диэлектрика. Поскольку рефракционная способность атмосферы сравнительно слаба, невозможно приписать полное сопротивление эфира атмосфере.

Совершенно недавний эксперимент Майкельсона (не путать с известным экспериментом Майкельсона и Морли) также делает гипотезу Стокса крайне маловероятной. Суть этого конкретного эксперимента заключается в том, чтобы послать два луча света вокруг Земли в противоположных направлениях. Его результатом было доказательство того, что луч, движущийся на восток, требует больше времени для завершения своего круга, чем луч, движущийся на запад. Такого не произошло бы, если бы Земля увлекала эфир за собой при вращении вокруг своей оси. Правда, этот эксперимент не доказал, что эфир не увлекается движением Земли по ее орбите, но, с другой стороны, он доказал, что вращательное движение Земли не производит такого увлечения. Это, конечно, сделало крайне маловероятной гипотезу о том, что движение Земли по ее орбите может быть более успешным в производстве увлечения эфира. Вышеупомянутый эксперимент Майкельсона является удачной иллюстрацией типа экспериментов, которые позволяют нам с помощью оптических средств обнаружить вращение или ускорение Земли в эфире, и поэтому не имеет отношения к проблеме, которую мы здесь исследуем, а именно к ее скорости в эфире. Единственная причина, по которой мы упомянули этот эксперимент, заключалась в его связи с гипотезой Стокса.

Таким образом, гипотеза Стокса была отвергнута, и наиболее удовлетворительное объяснение всех отрицательных экспериментов было дано Френелем. Необходимо понимать, что до этого момента все проведенные эксперименты были оптического характера и касались прохождения лучей света через диэлектрики (стекло, воду и т. д.). Такие эксперименты проводили Фуко, Эйри и Араго. Френелю удалось доказать с помощью математического анализа, что если диэлектрики частично переносят эфир в своем внутреннем пространстве, увеличивая его в определенной степени с их преломляющей способностью, то все отрицательные результаты, полученные до его времени, могут быть объяснены, при условии, что они не были получены с слишком высокой степенью точности. Этот требуемый процент переноса эфира диэлектриками был назван **коэффициентом конвекции Френеля**.

Гипотеза Френеля была подвергнута непосредственному экспериментальному тестированию. Физо обнаружил, в точности как и предсказывал Френель, что когда луч света распространялся через текущую воду, общая скорость луча света по отношению к трубке была равна его скорости через воду, когда вода была неподвижна, плюс *лишь* небольшая часть скорости воды в трубке; и что эта часть была точно равна коэффициенту конвекции, предсказанному Френелем.

Ввиду этого замечательного подтверждения гипотеза Френеля была признана вполне обоснованной, так что наука оказалась перед следующей ситуацией: эфир был неподвижен в том смысле, что Земля двигалась через него, никоим образом не возмущая его. Скорость движения через эфир имела, таким образом, определенное физическое значение, и над поверхностью Земли, в зависимости от времени суток, должен был дуть настоящий эфирный ураган в разных направлениях. Эксперименты не смогли его обнаружить не потому, что он не существовал, а из-за компенсирующего эффекта частичного сопротивления эфира движущимися диэлектриками. Однако такой неудачный результат

можно было считать лишь временным, поскольку гипотеза Френеля конкретно показывала, что этот компенсирующий эффект был лишь частичным и что эксперименты еще более высокой точности должны были бы обнаружить дрейф эфира на поверхности Земли, тем самым раскрывая абсолютную скорость Земли.

Очевидно, гипотеза Френеля была бы опровергнута, если бы более точные эксперименты также не смогли обнаружить эфирный ураган. Более того, даже при точности, предусмотренной Френелем, если в наших экспериментах мы должны были бы обратиться к явлениям, в которых диэлектрики не играли никакой роли, его гипотеза показывала, что этот компенсирующий эффект был лишь частичным, и эксперимент Майкельсона и Морли был именно такого типа. Он был не только гораздо более точным, чем все предыдущие, но и не включал в себя рефракцию. Однако, несмотря на все это, эксперимент Майкельсона и Морли снова дал отрицательный результат.

Следующий большой прорыв в понимании этой проблемы был сделан Лоренцем. Однако он, как и все его предшественники, не осмелился сделать большой шаг, а продолжал пытаться объяснить отрицательные результаты эксперимента, придерживаясь мнения о реальном неподвижном эфире. Как и следовало ожидать, Лоренц был вынужден обратиться к новым компенсирующим влияниям. Но прежде чем идти дальше, необходимо посвятить несколько страниц общей теме электродинамики, поскольку по мере продвижения вперед мы увидим, что теоретические соображения будут играть все более важную роль.

ГЛАВА XII

УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПО И ТЕОРИЯ ЛОРЕНЦА

Когда янтарь трется, он приобретает своеобразное свойство притягивать мелкие тела, такие как клочки бумаги, частицы пыли и т. п. Это явление, известное еще грекам, описывалось так: янтарь зарядился электричеством (*слово «электрон» в греческом языке означает «янтарь»*). Сегодня, однако, мы сказали бы, что он получил электрический заряд. Вскоре было обнаружено, что электризованные тела не всегда притягиваются друг к другу, но во многих случаях, по-видимому, оказывают отталкивающее действие. По этой причине было сделано предположение о существовании двух различных видов электричества: положительного и отрицательного; законы, управляющие этими явлениями, были сформулированы в виде утверждения, что одноименные заряды отталкиваются, а противоположные притягиваются. Аналогичные условия были обнаружены между магнитными полюсами, в результате чего было сделано предположение о существовании двух различных видов магнетизма. Однако магнетизм и электричество оставались совершенно разными явлениями; между электрическим зарядом и магнитным полюсом, по-видимому, не существовало взаимного воздействия.

Мы можем проиллюстрировать эти явления притяжения и отталкивания более конкретно, предположив, что невидимые поля электрических и магнитных сил окружают заряженные тела и магнитные полюса. Этим полям мы можем приписать механические действия притяжения и отталкивания, обнаруженные в ходе экспериментов; электрические поля действуют на заряженные тела, а магнитные — на магнитные полюса. Только в начале XIX века Кулон подверг взаимное притяжение и отталкивание заряженных тел количественному тестированию. Он обнаружил, что они выражаются законом (законом Кулона), который был обратно пропорционален квадрату расстояния; таким же, как закон всемирного тяготения Ньютона, за исключением того, что электрические заряды заменили массы, и что действия могли быть как притягивающими, так и отталкивающими.

Но с изобретением Вольта электрической батареи появилась новая форма проявления электричества, которую можно было изучать и исследовать, — электрический ток. Эрстед обнаружил, что электрический ток способен отклонять намагниченную стрелку, помещенную в его близости. Это имело большое значение, поскольку показывало, что электричество и магнетизм являются тесно связанными явлениями. Природа их взаимосвязи стала лучше понятна, когда, поместив железные опилки вокруг провода, было показано, что электрический ток окружен магнитным полем. Отклонение магнита в эксперименте Эрстеда было соответственно объяснено существованием магнитного поля, окружающего ток. В следующем году Ампер дал точную количественную формулировку соответствующих законов.

Теперь тот факт, что электрический ток генерировал магнитное поле, давал основание предполагать, что, наоборот, изменяющееся магнитное поле должно генерировать электрический ток. Если это так, то, согласно закону Эрстеда (), магнит, смещенный вблизи замкнутого провода, должен генерировать или индуцировать электрический ток в проводе. Это важнейшее явление, известное как *электромагнитная индукция*, было открыто Генри и Фарадеем, в результате чего связь между магнетизмом и электричеством стала еще более очевидной. Наши современные динамо-машины и генераторы — это не что иное, как

машины, сконструированные с целью использования этого явления индукции для генерации электрического тока в коммерческих целях.

Фарадей был первым ученым, который осознал огромную важность электромагнитного поля. Он видел в нем реальность новой категории, отличной от материи. Оно было способно передавать воздействия из одного места в другое и не могло быть сравнено с простой математической фикцией, какой тогда считалось гравитационное поле. По его мнению, к явлениям электричества и магнетизма следует подходить через поле, а не через заряженные тела и токи. Другими словами, согласно Фарадею, когда ток протекал по проводу, наиболее важным аспектом явления был не сам ток, а поля электрической и магнитной силы, распределенные по всему пространству вблизи тока. Именно это возвышение поля до положения превосходства часто называют *чистой физикой поля*. Фарадей не был математиком и не мог скоординировать предсказанные им явления математическим способом и извлечь полную пользу из своих идей. Однако перед смертью он поручил эту задачу своему коллеге Максвеллу, и в результате появилась одна из самых поразительных теорий науки, затмеваемая лишь в последние годы теорией относительности Эйнштейна.

Чтобы оценить природу вклада Максвелла, давайте вспомним, как обстояли дела в его время. Если мы ограничимся областями пространства, где нет электрических токов, заряженных тел или магнитов, так что необходимо учитывать только электрические и магнитные поля, то фундаментальным законом электромагнетизма является закон индукции Фарадея. Этот закон гласит, что переменное магнитное поле генерирует электрическое поле.

Однако Максвелл считал, что этот закон сам по себе не является симметричным, поэтому он сформулировал гипотезу, что, наоборот, переменное электрическое поле должно генерировать магнитное поле, и приступил к построению своей теории с учетом этой идеи.^[40] В частном случае свободного пространства, в котором присутствуют только поля, но нет зарядов или токов, уравнения электромагнетизма Максвелла, называемые уравнениями поля (поскольку они описывают состояние электромагнитного поля), могут быть записаны

$$\begin{array}{ll} (1) \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 & (3) \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \\ (2) \operatorname{curl} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{H}}{dt} & (4) \operatorname{curl} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt} \end{array}$$

следующим образом:

где $\mathbf{E}$ представляет собой интенсивность электрического поля, $\mathbf{H}$ — интенсивность магнитного поля, t обозначает время, c — важнейшую константу, о которой мы еще много скажем позже. Что касается «div» и «curl», то они представляют собой математические операции особого рода. В любом случае, читателю не следует пугаться этих уравнений, поскольку нам не обязательно их понимать. Достаточно сказать, что (2) представляет закон индукции Фарадея, а (4) — гипотетический закон, постулированный Максвеллом для обеспечения симметрии. До исследований Максвелла четвертое уравнение было бы записано как « $\operatorname{curl} \mathbf{H} = 0$ »; следовательно, именно добавление термина « $\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt}$ » составляет оригинальность теории.

Из своих уравнений поля Максвелл с помощью чисто математических средств смог

$$(5) \Delta E = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 E}{dt^2} \quad (6) \Delta H = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 H}{dt^2}$$

вывести два дополнительных уравнения:

где Δ представляет собой особый вид математической операции. На обычном языке эти два последних уравнения означают, что изменяющиеся электрические и магнитные интенсивности будут распространяться через эфир в виде волн со скоростью c , где c — величина, которая еще предстоит определить. Это открытие исключило всякую возможность действия на расстоянии, поскольку теперь казалось, что возмущения поля распространяются от места к месту с конечной скоростью. Конечно, было интересно определить точное значение c . Наиболее очевидным способом было бы создать электромагнитные возмущения, а затем непосредственно измерить их скорость распространения. Однако в эпоху Максвелла физики не были в состоянии разработать способ проведения таких сложных экспериментов. Но существовал другой способ определения значения c . Максвелл заметил, что оно будет задано отношением величины любого электрического заряда, измеренного последовательно в электростатических единицах (на основе электричества), а затем в электромагнитных единицах (на основе магнетизма).^[41] Точные измерения, проведенные на заряженных телах и магнитах, доказали, что значение этого отношения составляет около 186 000 миль в секунду; отсюда следовало предположить, что периодические возмущения в деформациях и напряжениях поля будут распространяться в виде волн, движущихся через эфир с этой конкретной скоростью. Но эта скорость была точно такой же, как скорость световых волн, распространяющихся через светоносный эфир.

Вывод был очевиден. Если только мы не хотели предположить, что это необычайное совпадение значений двух характерных скоростей, электромагнитной индукции и световых волн, было результатом слепого случая, не оставалось ничего другого, как признать, что то, что мы обычно называем лучем света, было ничем иным, как серией колебаний в электромагнитном поле, распространяющихся от точки к точке. Электромагнитные волны и световые волны были, таким образом, одним и тем же. Отныне два эфира, электрический эфир и светоносный эфир, рассматривались как одно и то же непрерывное пространство; электричество, магнетизм и оптика слились в одну науку.

Теперь, хотя экспериментаторы пытались различными способами проверить взгляды Максвелла, технические трудности были настолько велики, что успеха достичь не удалось. Из уравнений Максвелла ясно следовало, что значимых эффектов нельзя было ожидать,

если только интенсивность поля ($\frac{dE}{dt}$) не была очень велика; а это означало, что электрическая интенсивность (E) должна была изменяться с чрезвычайной быстротой. Самым простым способом получения такого результата было бы создание колеблющегося поля электрической интенсивности, в котором колебания были бы чрезвычайно быстрыми, несколько миллиардов в секунду. Но ни одно механическое устройство не могло дать таких результатов, а кроме механических устройств никаких других методов не предлагалось. По этим причинам прошло несколько лет, прежде чем взгляды Максвелла могли быть проверены.

В 1885 году Гельмгольц обратил внимание своего ученика Герца на эту проблему. Герц был одним из самых выдающихся экспериментаторов XIX века; ему наконец удалось преодолеть технические трудности и с помощью чисто электрических средств создать колеблющееся электрическое поле чрезвычайно высокой частоты. Таким образом, были получены электромагнитные волны достаточной интенсивности; и после того, как он на некоторое время отвлекся на второстепенное явление, природа которого была объяснена Пуанкаре, Герц подтвердил, что волны распространяются со скоростью света и действительно обладают всеми основными свойствами световых волн, кроме видимости для человеческого глаза. Таким образом, в результате экспериментов Герца были заложены основы для коммерческого использования беспроводной связи и радио; но, что еще более важно, наконец-то была подтверждена электромагнитная теория света Максвелла, устанавливающая тесную связь между электричеством и оптикой.

Так же как Герц доказал, что электромагнитные волны имеют ту же природу, что и световые волны, так и теперь, наоборот, Лебедев успешно показал, что световые волны имеют ту же природу, что и электромагнитные. Действительно, необходимым следствием теории Максвелла является то, что электромагнитные волны должны оказывать определенное давление на тела, на которые они воздействуют, и это давление было подтверждено и измерено Лебедевым, а затем Николсом и Халлом в случае световых волн, падающих на материю.^[42]

Однако следует понимать, что, какими бы замечательными ни были уравнения Максвелла в отношении явлений в поле в пустом пространстве, они приводили к противоречиям с экспериментами в присутствии материи. Это противоречие было особенно очевидным при рассмотрении явления дисперсии; под дисперсией мы понимаем расщепление белого света призмой на радугу цветов. Уравнения Максвелла доказали, что при попадании в прозрачный диэлектрик, такой как стекло, электромагнитные колебания, составляющие свет, замедляются; и это замедление, как было давно известно, объясняет рефракцию. Но дисперсия требует, чтобы угол преломления, а значит и замедление, зависели от частоты, а значит и от цвета колебаний света; и именно это теория Максвелла не смогла объяснить. Его уравнения показывали, что замедление будет одинаковым для всех частот. Аналогичная трудность возникла при рассмотрении явления магнитного поворота плоскости поляризации. Фарадей открыл существование этого явления, и любая теория электромагнетизма должна была бы его учитывать. Тем не менее, будет видно, что все эти трудности, которые преследовали теорию Максвелла, возникали исключительно при учете экспериментов с веществом. Поэтому казалось, что ошибка заключалась не в самих уравнениях поля, а в слишком грубых предположениях, которые были сделаны в отношении состава вещества.

Кроме того, Максвелл рассматривал в основном случай материи, находящейся в покое в эфире, а необходимо было исследовать общий случай материи, находящейся в движении. Это расширение теории Максвелла, известное как электродинамика движущихся тел, было предпринято Герцем, который предположил, что материя, движущаяся в эфире, увлекает эфир за собой в своем внутреннем пространстве — гипотеза не столь радикальная, но в некоторой степени согласующаяся с гипотезой Стокса. До тех пор, пока рассматривались проводники, гипотеза Герца казалась согласующейся с экспериментом, но когда мы перешли к рассмотрению диэлектриков в движении, предположения Герца оказались опровергнутыми. В частности, эксперимент Физо, доказавший, что скорость текущей воды не складывается со скоростью света в стоячей воде, был несовместим с гипотезой Герца о полном сопротивлении. Кроме того, в эксперименте совершенно иного характера,

посвященном движению диэлектрика в магнитном поле, Уилсон доказал существование того же частичного сопротивления, которое снова определялось коэффициентом конвекции Френеля. Таким образом, казалось, что коэффициент конвекции Френеля был фактом, который необходимо было учесть в любой теоретической схеме электродинамики движущихся диэлектриков.

Теперь гипотеза Френеля о частичном сопротивлении, хотя и подтвержденная экспериментом, все еще не была теоретически обоснована, и это казалось невозможным, пока мы оставались в полном неведении относительно конечной структуры диэлектриков и материи в целом. На этом этапе Лоренц начал свои теоретические исследования, которые привели его к уточнению уравнений Максвелла, расширив их применение на случаи, когда материя присутствовала в состоянии покоя или движения через эфир. Как мы уже упоминали, уравнения Максвелла оказались неспособными объяснить дисперсию. Появилась необходимость представить себе некую структуру диэлектриков, которая действовала бы избирательно, накладывая разные степени задержки на световые волны разных частот. Лоренц достиг этого результата, предположив, что электричество является атомным, а материя состоит из более или менее сложных групп этих электрических атомов или *электронов*.

В случае диэлектриков или непроводников, таких как стекло, предполагалось, что электроны привязаны к своим атомам упругими силами. При возмущении они вибрировали с некоторой характерной частотой, зависящей от величины упругих сил, удерживающих их на месте. Если же волна света проходит через прозрачный диэлектрик, электроны приводятся в принудительное колебание, и замедляющий эффект, который эти колебания оказывают на падающий свет, зависит от относительных частот падающего света и собственных частот электронов. Таким образом, можно было получить математическую интерпретацию дисперсии.

Дальнейшие явления были объяснены с учетом сопротивления трению, которое мешало бы быстрым колебаниям электронов. Когда это сопротивление трению было слабым, колебательные возмущения, такие как лучи света, могли распространяться через диэлектрик, который тогда называли прозрачным (стекло). Когда эти силы трения были значительными, луч света не мог заставить электроны колебаться; его энергия расходовалась на попытку, и в результате он не мог продвигаться; диэлектрик тогда был непрозрачным (эбонит, сера).

В случае проводников, таких как металлы, предполагалось, что электроны очень слабо удерживаются своими атомами, так что малейшая разница потенциалов отрывает их и заставляет мчаться в одном направлении, тем самым производя электрический ток. Именно потому, что электроны в проводниках не были привязаны к фиксированным позициям упругими силами, они были неспособны колебаться; поэтому проводники были обязательно непрозрачными для электромагнитных колебаний или света. И наоборот, именно потому, что все электроны были привязаны к фиксированным позициям в диэлектриках, они не могли устремляться в одном направлении. В результате диэлектрики были непрозрачны для токов и, следовательно, были непроводниками. Согласно этим взглядам Лоренца, электрический ток, проходящий через вещество, был ничем иным, как устремлением электронов. Если бы это было так, мы должны были бы ожидать, что движение заряженного тела будет генерировать магнитное поле тока. Роуланд установил существование этого эффекта много лет назад, так что теория Лоренца в этом отношении соответствовала фактам. Тот же эффект более ярко иллюстрируется магнитным полем, окружающим катодные лучи. Они состоят из потоков электронов, движущихся с огромной скоростью

через частичный вакуум; по этой причине катодные лучи имеют много общего с током, проходящим через металлический провод.

Предполагалось, что в абсолютно пустом пространстве электронов нет, и распространение электромагнитных возмущений в пространстве полностью объяснялось колебаниями поля, которое выделялось как проявление энергии, радикально отличающейся от материальных электронов.

В отличие от Герца, Лоренц предполагал, что эфир никогда не нарушается движением материи; и, как и в теории Максвелла, световой источник, движущийся через эфир, никогда не передает свою скорость излучаемым им световым волнам. С таким постулатом о составе материи Лоренц приступил к расширению теории электромагнетизма Максвелла в свободном эфире на случаи, когда материя присутствует, находясь в покое или в движении. Как уже упоминалось, ему удалось сформулировать теорию дисперсии, одного из явлений, которое Максвелл не смог объяснить. Кроме того, такая теория с большой точностью объясняла такие сложные явления, как аномальная дисперсия, поглощение, металлическое отражение, селективное отражение, цвет тела и многие другие.

Кажущееся частичное сопротивление эфира, подтвержденное в эксперименте Физо и также в эксперименте Уилсона (коэффициент конвекции Френеля), оказалось необходимым следствием теории. Оно не имело ничего общего с частичным сопротивлением эфира, поскольку эфир никоим образом не нарушал равновесие () движением материи; кажущееся сопротивление объяснялось исключительно электронной структурой движущейся материи. Таким образом, коэффициент конвекции Френеля получил рациональное объяснение, которого ему до сих пор не хватало. Наиболее точные эксперименты подтвердили теорию Лоренца во многих мельчайших деталях; и когда электрон был наконец изолирован и изучен, все сомнения, по крайней мере, относительно общей правильности этой теории, казалось, были развеяны.

Однако теории особенно убедительны не столько тогда, когда они объясняют то, что было наблюдаемо, но не объяснено, сколько тогда, когда они позволяют нам предсказывать явления, которые никто не предвидел. Триумфы такого рода вскоре последовали в случае теории Лоренца. Например, теория требовала, чтобы световые волны производились электронами, вибрирующими внутри атома. Поскольку наличие магнитного или электрического поля влияет на движение заряженных тел, колебания электронов в светящемся атоме должны изменяться под воздействием сильного магнитного поля. Расчеты показали Лоренцу, что магнитное поле заставит атом, обычно излучающий монохроматический свет, излучать два или три отдельных луча в зависимости от относительного наклона магнитного поля к линии зрения наблюдателя. Этот совершенно неожиданный эффект вскоре был подтвержден Зееманом, одним из коллег Лоренца, и теперь известен как эффект Зеемана. С тех пор он наблюдался в свете, излучаемом солнечными пятнами, что доказывает наличие там очень интенсивных магнитных полей.

Нет необходимости останавливаться на ряде дальнейших подтверждений теории Лоренца. Все, что мы хотели показать, это то, что эмпирические открытия, которые придают вес электронной теории Лоренца, настолько многочисленны, что ее нельзя легко отбросить. Хотя ни одно достижение в теоретической физике не может претендовать на вечность, однако, учитывая удивительную точность предсказаний Лоренца, потребовалась бы действительно веская причина, чтобы мы почувствовали себя оправданными в том, чтобы изменять ее в каких-либо существенных деталях.

Электронная теория Лоренца также полностью согласуется с упомянутыми нами ранее отрицательными экспериментами, поскольку она объясняет существование коэффициента

конвекции Френеля; и мы видели, что этот коэффициент, в свою очередь, объясняет отрицательные результаты экспериментов, проведенных с первым порядком приближения в диэлектрических средах, движущихся через эфир. Но теория Лоренца в ее нынешнем виде предполагает, что эксперименты, проведенные с более высокой степенью точности, например, второго порядка, перестанут давать отрицательные результаты; так что с помощью экспериментов такого рода наше движение через эфир будет обнаружимо.⁽⁴³⁾

Исследование Майкельсона и Морли как раз и относится к этому типу. Это исследование второго порядка. Предполагается, что читатель достаточно хорошо знаком с ним, чтобы не было необходимости в его подробном описании. Вкратце, эксперимент доказывает, что если волны света одновременно покидают центр сферы, они вернутся в идеальном унисоне в центр сферы после отражения от внутренней поверхности сферы, независимо от того, в каком направлении через эфир или с какой постоянной скоростью движется сфера, прикрепленная к Земле. Объяснение было предложено как Фитцджеральдом, так и Лоренцем, и заключалось в том, что сфера сократилась в определенной степени в направлении своего движения через эфир. Соответственно, сфера стала эллипсоидом, и отрицательный результат Майкельсона был объяснен.

В более общем плане, любое тело, например, мерная линейка, лежащее в направлении движения Земли через эфир, сократится и станет короче, чем если бы оно было расположено перпендикулярно эфирному урагану. Однако у нас никогда не будет средств обнаружить это сокращение, поскольку все вещи, включая человеческое тело, будут участвовать в нем, отчего, по крайней мере с точки зрения наблюдения, ничего не изменится.

Эта гипотеза сжатия Лоренца-Фитцджеральда была сформулирована специально с единственной целью объяснить нулевой результат эксперимента Майкельсона; и, как и все подобные гипотезы, она могла быть принята только при условии, что она будет подтверждена множеством экспериментов. В то время, когда была выдвинута эта гипотеза, ученые были заняты изучением движения электрона в эфире. Абрахам предположил, что электрон, движущийся с высокой скоростью через эфир, останется сферическим и жестким; и он математически рассчитал траекторию, по которой будет двигаться жесткий электрон под действием электрических и магнитных сил. Лоренц, придерживаясь своего взгляда на сокращение Фитцджеральда, занялся той же проблемой, предположив, что электрон будет сокращаться все больше и больше по мере увеличения его скорости через эфир. Экспериментаторы были призваны выбрать между гипотезами о *жестком* и *сокращающемся* электроне. Соответственно, были проведены высокоточные эксперименты с электронами, испускаемыми радиом (β лучи). Кауфман, сфотографировав траектории движения электронов, пришел к выводу, что жесткий электрон Абрахама соответствует действительности. Но еще более точные эксперименты, проведенные Бухерером, изменили вердикт, и осталось мало сомнений в том, что электрон подвергается сокращению Фитцджеральда в той степени, в какой этого требует Лоренц.

Поскольку предполагалось, что материя состоит из электронов, эти эксперименты Бухерера придали вес сокращению материи по Фитцджеральду, а значит, и объяснению Лоренца-Фитцджеральда нулевого результата Майкельсона. Поскольку это сокращение, по-видимому, было установлено, экспериментаторы предприняли попытки обнаружить его в телах, прикрепленных к Земле. Если бы этот результат был достигнут, у нас появился бы способ определить скорость Земли в эфире; и все были уверены, что на этот раз нам сопутствует успех.

Теперь, как мы уже упоминали, если в нашей системе отсчета, например, на поверхности Земли, все вещи, включая наши измерительные стержни и наши собственные тела, сокращались бы точно так же из-за движения нашей планеты через эфир, то, конечно, было бы бессмысленно ожидать, что это сокращение будет наблюдаемо при прямом измерении. Но хотя это сокращение не наблюдается напрямую, утверждалось, что оно должно изменять оптические и электрические свойства тела, так что изучение изменений этих свойств при последовательном размещении тела в разных направлениях должно дать нам движение Земли через эфир. В частности, сокращение твердого прозрачного тела вследствие его движения через эфир должно вызывать явление двойного преломления, подобно тому, как это происходит при обычном физическом сжатии тела. Эксперимент Рэлея и Брейса был основан на этой идее, но результат оказался полным разочарованием. Сокращение Фитцджеральда не вызвало такого эффекта, и был зарегистрирован отрицательный результат. Эксперимент Траутона и Рэнкина был направлен на обнаружение изменения электропроводности металлической полоски в результате сжатия по Фитцджеральду. И снова результат оказался отрицательным. После неудачи этих экспериментов Траутон и Нобл предложили и провели еще один эксперимент. Суть этого эксперимента основывалась на хорошо известном явлении, подтвержденном Роуландом, что движущееся заряженное тело производит все эффекты электрического тока. Следовательно, если два заряженных тела были бы помещены рядом, движение Земли через эфир должно было бы производить два параллельных электрических тока; а поскольку параллельные электрические токи притягивают друг друга, очень чувствительные торсионные весы должны были бы обнаружить это притяжение. И снова результат этого эксперимента был отрицательным; скорость движения Земли через эфир полностью ускользнула от нас.

Следует отметить, что последние два эксперимента относятся исключительно к электричеству и электродинамике; в них нет ничего, что имело бы отношение к оптике. Следовательно, можно предположить, что все электромагнитные явления ведут себя одинаково, независимо от скорости эфирного урагана (). Другими словами, они тоже дают отрицательные результаты. Но у этих экспериментов есть еще один аспект.

Если мы считаем сокращение Фитцджеральда физически реальным — а мы должны это делать, чтобы объяснить отрицательный результат Майкельсона — мы должны признать, что оно, безусловно, компенсируется чудесным образом, поскольку ни один эксперимент, будь то оптический или электрический, не способен его выявить. Кроме того, в последнем эксперименте, проведенном Траутоном и Ноблом, мы имеем дело не в первую очередь с сокращением Фитцджеральда; мы имеем дело с экспериментом по электродинамике и пытаемся обнаружить чисто механическую силу, возникающую в результате движения наших электризованных тел через эфир. Законы электродинамики требуют, чтобы такая сила генерировалась, но никакой силы не наблюдается; поэтому мы должны предположить, что таинственные компенсации, которые скрывают наше движение через эфир, носят настолько общей природы, что влияют как на механику, так и на электромагнетизм и оптику.

Правда, ни один из экспериментов, которые мы смогли провести, не превышал второго порядка по точности; и в теории Лоренца, даже с учетом сокращения Фитцджеральда, не было ничего, что позволяло бы предположить, что все эксперименты, независимо от их характера и степени точности, не смогут обнаружить нашу скорость движения через эфир. Очень простой гипотетический эксперимент прояснит этот момент. Предположим, например, что Земля мчится через эфир со скоростью, приближающейся к скорости света, и предположим, что мы внезапно встали перед зеркалом. Все, что гарантировала бы гипотеза сокращения Фитцджеральда, — это то, что время, необходимое лучам света, чтобы покинуть

наше тело и отразиться обратно в наши глаза, не зависит от ориентации зеркала по отношению к движению Земли. Но фактическая продолжительность, необходимая световым лучам, а значит, время, необходимое для того, чтобы наше изображение появилось перед нами, будет зависеть в основном от скорости Земли в эфире; так что, по крайней мере теоретически, измерение продолжительности должно раскрыть эту загадочную скорость.

Однако, учитывая тот факт, что высокоточные эксперименты, которые были проведены, не смогли обнаружить эту скорость движения через эфир, казалось оправданным сделать вывод, что на карту поставлено нечто более глубокое и что, по всей вероятности, эта скорость останется незамеченной, как бы мы ни повышали точность наших электродинамических или оптических экспериментов и как бы ни варьировали их характер. Лоренц принял то, что казалось ему неизбежным, и утверждал, что пришло время признать, что природа, по-видимому, вступила в какой-то гигантский заговор, чтобы лишить нас знания о нашей скорости через эфир. Соответственно, он сформулировал свой знаменитый **принцип корреляции** « », согласно которому корректировки в природе регулируются таким образом, что скорость нашей планеты через эфир никогда не может быть обнаружена, какими бы точными ни были наши эксперименты.

Лоренц применил свои математические таланты к открытию необходимых корректировок, которые должны были бы существовать в природе, чтобы эта корреляция была полностью удовлетворена в том, что касается электродинамики и оптики. Чтобы понять значение его исследований, мы должны вспомнить то, что мы сказали о законах природы и преобразованиях пространства и времени.

Мы помним, что ньютонова относительность выражала тот факт, что механические явления, а значит и законы механики, регулирующие эти механические явления, оставались неизменными при переходе от одной галилеевой системы отсчета к другой. Значение этого утверждения заключается в следующем:

Во-первых, когда мы хотим зафиксировать положение тела в нашей системе отсчета, необходимо также указать момент времени, в который тело занимает это положение. Таким образом, мы должны учитывать четыре координаты: три для пространства, x, y, z ; и одну для времени, t . Если теперь мы изменим нашу систему отсчета, перейдя в какую-либо другую галилееву систему, которая движется относительно первой, эти координаты изменят свое значение или будут преобразованы. Например, если тело остается в покое в точке пересечения трех осей нашей первой системы, его координаты всегда будут $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$ в этой системе для всех значений времени t . Но, рассчитанные относительно нашей второй системы, новые координаты, представленные x', y', z' , будут изменяться со временем, поскольку относительно этой второй системы тело движется, т. е. принимает последовательные положения во времени.

Классические галилеевы преобразования имели целью точно сказать нам, как эти координаты будут изменяться при переходе от одной галилеевой системы отсчета к другой. Поскольку классическая наука всегда предполагала, что время является абсолютным, одинаковым для всех систем, единственными координатами, подверженными изменению при смене систем отсчета, были пространственные координаты x, y, z . Что касается t , то она имела одинаковое значение во всех системах отсчета, что выражалось записью $t' = t$. Теперь законы или уравнения, которые управляют явлениями, содержат в своем выражении, среди прочих величин, эти координаты: x, y, z, t . Следовательно, в общем случае следует ожидать, что законы изменятся по форме, когда мы соотнесем их сначала с одной галилеевой системой отсчета, а затем с другой; или, опять же, когда мы заменим x, y, z, t на x', y', z', t' .

y', z', t' . Когда мы говорим, что законы не претерпевают никаких изменений по форме или преобразуются в самих себя, мы имеем в виду, что эта замена старых координат новыми не изменяет форму уравнений или законов.

Теперь мы можем понять, какое математическое условие должно быть выполнено, чтобы принцип корреляции Лоренца оставался верным. Этот принцип утверждает, что все в природе устроено так, что абсолютная скорость в эфире всегда будет ускользать от нас. Другими словами, все электродинамические эксперименты дадут отрицательные результаты. Но это, очевидно, делает необходимым, чтобы законы электродинамики, которые управляют всеми электродинамическими явлениями, а значит, всеми электродинамическими и оптическими экспериментами, оставались неизменными по форме, когда мы переходим от одной галилеевой системы к другой (). На математическом языке, законы электродинамики останутся неизменными, когда мы подвергнем их преобразованиям пространства и времени.

Теперь мы сказали, что при подвергании классическим преобразованиям пространства и времени инвариантность уравнений электродинамики не сохраняется. Тогда оказалось, что, вопреки отрицательным результатам экспериментов и вопреки принципу корреляции Лоренца, скорость движения через эфир должна быть обнаруживаема с помощью электромагнитных экспериментов. Таким образом, наука оказалась в чрезвычайно затруднительном положении; уравнения электродинамики были настолько убедительно подтверждены чрезвычайно точными экспериментами, что мы едва ли могли подвергнуть сомнению их точность. Оставалась только одна альтернатива, а именно, усомниться в точности классических преобразований.

Именно этим путем пошел Лоренц. Ему удалось установить преобразования, которые согласовывались с инвариантностью электродинамических уравнений, и он обнаружил, что они заметно отличаются от классических преобразований, хотя в случае низких скоростей сводятся к последним. Новые преобразования составляют знаменитые **преобразования Лоренца**.^[44]

В переводе на обычный язык эти преобразования выражали существование двух отдельных явлений: во-первых, сокращение Фицджеральда тел, движущихся через эфир, явление, с которым мы уже знакомы; и, во-вторых, новое явление, заключающееся в замедлении (с увеличением скорости через эфир) скорости течения времени, применимой к электромагнитным процессам. Таким образом, в отличие от классических преобразований, где время было абсолютным ($t' = t$), мы видим, что в преобразованиях Лоренца эта абсолютность времени начинает подвергаться сомнению. Однако по психологическим причинам, проникнутый духом классической науки, Лоренц не смог осознать важность своего открытия и так и не смог избавиться от своей веры в абсолютность времени. Для него, как и для Лармора, который внес свой вклад в эти открытия, этот новый вид переменной продолжительности, зависящий от движения через эфир галилеевой системы отсчета, не был реальным временем. Это был вид «местного времени» — искажение реального времени — и не предполагалось, что это местное время каким-либо образом соответствовало времени, которое наблюдатель в движущейся системе отсчета жил бы и ощущал.

Итак, Лоренц предположил, что эти новые преобразования применимы только к чисто электромагнитным величинам, и не было сделано никаких упоминаний о том, что они применимы также к механическим явлениям. Хотя в результате этих преобразований скорость света оказалась всегда одинаковой во всех галилеевых системах отсчета, когда она

измерялась наблюдателем в системе отсчета, это не вызвало подозрений в отношении классической формулы для сложения скоростей материальных тел, и это несмотря на то, что эти два обстоятельства были взаимно несовместимы.

Похоже было, что Лоренц по-прежнему считал классические формулы преобразования реальными, а новые преобразования — лишь ограниченными по применению и относящимися исключительно к электромагнитным величинам. Поэтому, когда в таких экспериментах, как эксперименты Траутона и Нобла, механические и чисто электромагнитные эффекты были неразрывно связаны, возникла большая неясность. Однако Лоренц сумел выбраться из затруднительного положения и объяснить все отрицательные эксперименты, но для этого ему пришлось прибегнуть к дополнительным гипотезам, таким как изменение тех упругих сил, которые заставляют электроны вибрировать в прозрачных телах (эксперименты Рэлея и Брейса). Аналогичным образом можно было объяснить отрицательный результат эксперимента Траутона и Нобла. Тем не менее, мы можем понять многочисленные трудности, к которым приводила нас теория Лоренца. Мы очень мало знали о строении материи, и здесь, в теории Лоренца, мы были вынуждены объяснять отрицательные эксперименты, принимая во внимание это неизвестное строение материи.

Принимая теорию Лоренца в ее нынешнем виде, нельзя не признать, что это накопление гипотез, постулированных *ad hoc*, делает ее болезненно искусственной. Согласно теории, эфир следует рассматривать как неподвижный, а Земля движется через него с определенной скоростью. Однако эта скорость должна оставаться для нас вечно неизвестной. Ее неуловимость возникает из-за замедления времени и сокращения Фитцджеральда в случае простейших электромагнитных экспериментов; в случае экспериментов, связанных с диэлектриками и проводниками, мы должны прибегать к еще более сложным корректировкам, относящимся к структуре материи. Но хотя наша скорость движения через эфир была вечно неопределимой, она была реальностью; она существовала, и если бы не все эти компенсирующие эффекты, она была бы замечена. Казалось, что все силы космоса сговорились лишить нас знания, которое мы так стремились получить, а именно скорости движения нашей планеты через эфир.

Существование сокращения Фитцджеральда, одинакового для всех тел, было примером этого удивительного заговора природы. Даже если бы мы допустили, что вся материя состоит из электронов и что составляющие ее электроны уплощаются в результате своего движения через эфир, все равно было бы невозможно представить себе одинаковое уплощение для всех тел, будь то твердых или мягких, если только мы не предположили бы, что соответствующая корректировка произошла и в других факторах, входящих в состав материи (эластичные силы и т. д.). Вся теория была крайне неудовлетворительной. Если природа была слепа, то каким чудесным совпадением все вещи были настолько скорректированы, чтобы скрыть скорость движения через эфир? А если природа была мудра, то у нее наверняка были другие вопросы, более достойные ее внимания, и она вряд ли была заинтересована в том, чтобы мешать нашим слабым попыткам философствовать. В теории Лоренца, когда мы вносим в ее систему все эти необычные *специальные* корректировки, природа выглядит злонамеренной; было чрезвычайно трудно смириться с тем, что в универсальном плане можно найти такие человеческие черты.

Возможно, обсуждению этих трудностей доэйнштейновской физики было уделено больше места, чем было необходимо, но цель этих длинных объяснений заключалась в том, чтобы показать, что наука столкнулась с чрезвычайно сложной ситуацией. Прежде чем перейти к изучению решения Эйнштейна, мы должны упомянуть предварительную гипотезу, выдвинутую швейцарским физиком Ритцем.

Ритц заметил, что эксперимент Майкельсона можно объяснить, если предположить, что, вопреки требованиям электромагнитной теории света, волны света испускаются из источника света так же, как пули вылетают из ружья. Согласно этой баллистической теории, скорость луча света по отношению к наблюдателю будет определяться постоянной скоростью луча по отношению к его источнику, сложенной с относительной скоростью наблюдателя и источника. Теперь нет ни малейшего сомнения в том, что гипотеза Ритца дает объяснение отрицательному результату Майкельсона, но, с другой стороны, она приводит нас к серьезным трудностям, когда мы хотим интерпретировать ряд других экспериментов, например, эксперимент Бухерера. Это можно понять, если учесть, что гипотеза Ритца заставляет нас отрицать существование сокращения Фитцджеральда, поскольку если бы сокращение существовало в дополнение к предположению Ритца, эксперимент Майкельсона больше не давал бы отрицательного результата. Но, как мы уже сказали, сокращение Фитцджеральда позволяет очень просто объяснить увеличение массы движущегося электрона в эксперименте Бухерера. Эта трудность не была бы непреодолимой, но все же она представляла бы собой аргумент против принятия идеи Ритца. Другими экспериментами, которые было бы чрезвычайно трудно объяснить, являются эксперименты, связанные с коэффициентом конвекции Френеля, например, эксперимент Физо.

Кроме того, согласно концепции Ритца, скорость световой волны в эфире складывается со скоростью источника, поэтому частота света, исходящего из источника и движущегося к нам через эфир, увеличивается, а длина волны остается неизменной. Так вот, угол преломления монохроматического луча света, проходящего через призму, зависит от частоты падающего света, тогда как дисперсия, вызванная решеткой, зависит от длины волны. Следовательно, должно быть возможно определить, действительно ли частота и длина волны ведут себя как независимые переменные, как того требует гипотеза Ритца. Эксперименты, проведенные Старком в 1910 году с лучами каналов, опровергли предположения Ритца. Впоследствии другие эксперименты привели к тем же результатам.

Помимо этих возражений против взглядов Ритца, необходимо понимать, что эксперимент Майкельсона был лишь одним из многих. Здесь нельзя не подчеркнуть, что серьезность ситуации заключалась в том, что в результате большого числа различных экспериментов (многие из которых мы не упомянули) вся структура классической электродинамики, казалось, рушилась со всех сторон. Гипотеза Ритца заключается в том, чтобы вернуть на место один отдельный кирпичик. Лоренц, благодаря своим математическим знаниям, понял, что в основе всех проблем лежит нечто гораздо более глубокое и что необходимо принять более радикальные меры. Соответственно, он приступил к пересмотру самых основ науки, а именно преобразований пространства и времени, которые существовали на протяжении веков. Но Лоренц действовал без энтузиазма и не имел мужества довести свои открытия до логического завершения, довольствуясь скорее исправлением, чем перестройкой. Эйнштейн, как мы увидим, взял быка за рога, отказался от классической структуры и приступил к построению совершенно нового здания, великолепно согласованного и свободного от всякой искусственной поддержки и подпор. Так случилось, что еще до того, как гипотеза Ритца была опровергнута многочисленными прямыми исследованиями (экспериментами Майораны и Саньяка, а также астрономическими наблюдениями двойных звезд де Ситтером), ученые перестали серьезно ее рассматривать.

ЧАСТЬ II
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ГЛАВА XIII

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

Однако, несмотря на то, что теория Лоренца могла показаться неудовлетворительной по многим уже обсужденным причинам, в течение нескольких лет она оставалась единственным возможным объяснением отрицательных результатов всех электромагнитных экспериментов, проводившихся на поверхности Земли. Но в 1905 году Эйнштейн опубликовал статью «Электродинамика движущихся тел», которая стала одним из самых эпохальных событий в истории человеческой мысли. В этой статье были сметены все паутины электродинамики.

Суть позиции Эйнштейна заключалась в том, что трудности, которые препятствовали изучению электродинамики (мы упомянули лишь небольшую их часть), возникли из-за того, что мы сохраняли застоявшийся эфир в качестве фундаментальной системы отсчета; но, учитывая аномалии, к которым привела эта позиция, пришло время подвергнуть ее критическому анализу. В конце концов, мы знали о эфире мало или ничего; зачем же тогда начинать с утверждения, что он является абсолютной средой, плавающей в пространстве, и тем самым препятствовать всякому будущему прогрессу? Зачем утверждать, что скорость движения через эфир должна иметь физическое значение, а затем, несмотря на отрицательные результаты экспериментов, выдвигать сложные гипотезы, чтобы объяснить абсолютную природу явления, которую мы сами ввели? Не было бы проще принять более осторожную позицию, черпая знания из экспериментов, а не пытаться согласовать эксперименты с рядом *априорных* убеждений, которые, насколько мы знаем, могут быть совершенно ошибочными?

Если мы, следуя Эйнштейну, придерживаемся этой линии рассуждений, мы должны предположить, что большое количество отрицательных экспериментов окончательно доказывает, что скорость движения через неподвижный эфир или через пространство не имеет физического значения не только с чисто механической точки зрения, как считала классическая наука, но и с *любой* другой точки зрения. Если мы примем эту относительность эфира и пространства для галилеева движения как фундаментальный факт природы, действующий для всех видов экспериментов, то наши прошлые трудности окажутся нашим собственным творением. Мы пытались обнаружить то, что не имело смысла, а затем обвиняли природу в том, что она обманывает нас и скрывает это от нас. Вместо того, чтобы сказать, что скорость через эфир казалась бессмысленной, потому что она была бессмысленной, мы усложнили дело, сказав, что скорость казалась бессмысленной, но, конечно, не была бессмысленной.

Помимо отрицательных экспериментов, Эйнштейн уделяет особое внимание другому типу явлений. Так, независимо от того, перемещаем ли мы магнит перед замкнутой цепью или замкнутую цепь перед магнитом, индуцированный в проводе ток () в обоих случаях одинаков, насколько это можно определить экспериментально. Важное значение имеет относительное движение между магнитом и цепью; соответствующие абсолютные скорости магнита и цепи в эфире, которые, конечно, в обоих случаях различны, кажутся совершенно несущественными.

Учитывая важность этого вопроса, приведем еще один пример. Мы помним, что при обсуждении электрических явлений на первых страницах предыдущей главы мы упомянули, что заряженное тело окружено электрическим силовым полем, тогда как ток

окружен как электрическим, так и магнитным полем. Последующие эксперименты, проведенные Роуландом, подтвердили мнение, что заряженное тело в движении генерирует те же электрические и магнитные поля, что и ток, протекающий по проводу, так что мы были вынуждены согласиться с тем, что заряженное тело в движении создает магнитное поле исключительно за счет своего движения.

И здесь мы снова сталкиваемся с затруднением в понимании того, что следует понимать под движением. Классическая наука предполагала, что движение в данном случае означает движение по отношению к неподвижному эфиру, и что электрический ток состоит из движения электронов через эфир. Эта точка зрения сталкивается с многочисленными трудностями. Благодаря движению Земли через эфир, каждое заряженное тело на поверхности Земли будет создавать электрический ток, так что вокруг каждого электрически заряженного тела должно присутствовать магнитное поле. Однако эксперименты не смогли обнаружить это магнитное поле. Было ли это связано с неточностью наших экспериментов? Такое объяснение было маловероятным, поскольку, когда мы перемещали заряженное тело перед намагниченной стрелкой (эксперимент Роуланда), стрелка отклонялась, доказывая, что эксперименты были вполне способны обнаружить магнитное поле, когда оно действительно возникало. Похоже, что скорость, составляющая ток, вовсе не была скоростью движения через эфир, а скоростью относительно регистрирующего прибора или, в более общем смысле, относительно наблюдателя. И снова единственным типом скорости, который, по-видимому, имел какое-либо значение в природе, была относительная скорость, а не скорость движения через неподвижный эфир или абсолютное пространство.

Следовательно, Эйнштейн постулировал свой **специальный принцип относительности**, согласно которому галилеево движение через эфир или пространство не имеет смысла. Этот принцип, как мы видим, является лишь расширением ньютоновского механического принципа на случай эфира, или, другими словами, на электромагнитные и оптические эксперименты.

То, что называется **специальной теорией относительности**, касается рациональных последствий, которые должны вытекать из специального принципа. Эти последствия можно предсказать следующим образом: если галилеево движение через эфир не имеет смысла, то законы электродинамики должны оставаться неизменными по форме, когда мы меняем нашу галилееву систему отсчета. Но это означает, что преобразования пространства и времени, которым подвергаются координаты всех точек, когда мы меняем системы, должны быть заданы преобразованиями Лоренца.

Однако в теории Эйнштейна значение преобразований совершенно иное. Следует помнить, что в обычном языке эти преобразования подразумевали сокращение Фицджеральда и замедление времени. В теории Лоренца эти изменения возникали в результате реальной скорости движения через эфир; и хотя наблюдатель в движущейся системе отсчета не мог обнаружить их наличие, тем не менее, несмотря на все, они были физически реальными. С другой стороны, в теории Эйнштейна, поскольку скорость движения через эфир не имеет значения, модификации возникают только в результате относительного движения одной системы отсчета по отношению к другой и, таким образом, обусловлены условиями наблюдения, а не какими-либо внутренними изменениями. Например, если в двух галилеевых системах отсчета, изначально находящихся в относительном покое, разместить два одинаковых часы и два одинаковых куба, а затем привести обе системы в относительное движение, то каждый из наблюдателей в результате своих измерений обнаружит, что часы другого наблюдателя замедлились, а его куб стал

более плоским в направлении относительного движения. Ничего не произошло бы с кубами и часами; изменились бы только условия наблюдения.

Математически это означает, что переменная v , входящая в преобразования Лоренца, теперь обозначает относительную скорость одной системы отсчета по отношению к другой, а не скорость движения через эфир. В этом смысле преобразования теории Эйнштейна, хотя и идентичные по внешнему виду преобразованиям Лоренца, имеют совершенно иное значение. Чтобы избежать путаницы, часто используется название **«преобразования Эйнштейна-Лоренца»** или **«преобразования Лоренца-Эйнштейна»**.^[145]

Существует еще одно, самое важное различие, отличающее последствия преобразований в двух теориях. В теории Лоренца был привилегированный наблюдатель, находящийся в системе отсчета, неподвижной в эфире. В теории Эйнштейна такого привилегированного наблюдателя нет, поскольку привилегированное состояние покоя в эфире не имеет смысла, и все наблюдатели в галилеевых системах отсчета находятся в равных условиях. Следовательно, различие, проводимое Лоренцем между истинным временем системы, находящейся в покое, и искаженным, локальным или электромагнитным временем систем, движущихся в эфире, теряет свое значение. Отныне все эти так называемые локальные времена, заданные преобразованиями Лоренца, составляют истинные времена, переживаемые, ощущаемые и испытываемые соответствующими наблюдателями в их соответствующих галилеевых системах отсчета.

Поскольку больше нет причин подчинять одну систему отсчета другой, описания *всех явлений* с точки зрения пространства и времени находятся на равных условиях во *всех галилеевых системах отсчета*; и больше нет причин следовать Лоренцу в ограничении действительности преобразований только случаем электромагнитных явлений. Отныне эти преобразования кажутся универсально применимыми, действующими для механики, для состава скоростей и, действительно, для всей вселенной физических явлений. Это убеждение не зависит от того факта, что, поскольку материя состоит из электронов, все механические эксперименты должны рассматриваться как электродинамические эксперименты, наблюдаемые под микроскопом. Скорее это связано с тем, что эти изменения в пространстве и времени являются абсолютно общими. Они возникают из относительного движения наблюдателя, а не из особенного микроскопического строения наблюдаемых явлений.

Метод изложения теории Эйнштейна, которому мы следовали до этого этапа, не является обычным, но нам показалось предпочтительным поступить таким образом, чтобы выделить некоторые важные особенности, которые затушевываются в обычном изложении (эти особенности будут лучше поняты позже). Теперь мы перейдем к обычной процедуре.

Как доказал Максвелл много лет назад, необходимым следствием законов электромагнетизма было то, что световые волны *в вакууме* в неподвижном эфире должны распространяться со скоростью 186 000 миль в секунду. Это был знаменитый закон распространения света классической науки. Теперь мы видим, что законы электромагнетизма (и их непосредственное следствие, закон распространения света) действуют только для привилегированных наблюдателей, находящихся в любой системе отсчета, неподвижной в неподвижном эфире. Что касается всех других галилеевых наблюдателей, находящихся в системах отсчета, движущихся через эфир, то применение классических преобразований показало, что уравнения электромагнетизма, а вместе с ними и скорость распространения света, будут изменены. Но поскольку суть относительности галилеева движения заключается в лишении любого конкретного галилеева наблюдателя его привилегированного положения, законы электромагнетизма теперь должны сохранять

одинаковую форму для всех галилеевых наблюдателей. Следовательно, закон распространения света, который является математическим следствием этих электромагнитных законов, должен также действовать точно так же для всех галилеевых наблюдателей. Отсюда новый результат: *«Световые волны должны распространяться с одной и той же неизменной скоростью 186 000 миль через любую галилееву систему отсчета, когда эта скорость измеряется наблюдателем, находящимся в этой системе»*. Именно это утверждение Эйнштейн назвал **принципом** или **постулатом неизменной скорости света**.

Если мы объединим этот принцип с относительностью эфира для галилеева движения и попытаемся построить преобразования, которые будут совместимы с этими двумя принципами, мы снова придем к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна.^[46] Это не должно нас удивлять, поскольку, как мы видели, принцип неизменной скорости света является лишь прямым следствием неизменности электродинамических уравнений; таким образом, преобразования, обеспечивающие неизменность, будут одинаковыми в обоих случаях.

Короче говоря, мы видим, что, не обращаясь непосредственно к уравнениям электродинамики, мы можем вывести преобразования Лоренца-Эйнштейна, просто взяв во внимание одно из их следствий, а именно инвариантную скорость света, и соединив его с относительностью галилеева движения. С математической точки зрения этот подход является более простым. Следовательно, Эйнштейн выдвигает в качестве своих фундаментальных предположений:

1. Относительность пространства или эфира для галилеева движения, или, проще говоря, относительность галилеева движения без особой ссылки на эфир или пространство.
2. Постулат или принцип неизменной скорости света.

Эта процедура, которой следовал Эйнштейн, дает ряд преимуществ. Во-первых, как мы уже сказали, математическое открытие преобразований Лоренца-Эйнштейна значительно упрощается. Во-вторых, поскольку классический закон распространения света, хотя и является следствием законов электромагнетизма, не поддается проверке прямым экспериментом без ссылки на законы электромагнетизма, нет необходимости привлекать эти весьма сложные законы. Фактически, даже если бы законы электромагнетизма были неизвестны, для построения теории потребовались бы только относительность скорости и классический закон распространения света. Следовательно, с точки зрения математической элегантности, эта процедура, безусловно, является чрезвычайно простой. Кроме того, поскольку в теории Эйнштейна преобразования Лоренца-Эйнштейна имеют общее применение и касаются не только электромагнитных явлений, предпочтительно избегать придания им исключительно электромагнитного аспекта. Эта цель достигается путем вывода их из общего закона распространения, такого как закон распространения света.

С другой стороны, такой метод изложения, апеллирующий к распространению света, может сбить с толку начинающего, который склонен предполагать, что Эйнштейн постулировал инвариантную скорость света как гипотезу *ad hoc* с единственной целью объяснить отрицательный результат эксперимента Майкельсона. Таким образом, вся теория якобы зависит от эксперимента Майкельсона, и критик предполагает, что если бы эксперимент Майкельсона можно было объяснить каким-то другим способом, теория Эйнштейна была бы опровергнута. Это предположение кажется критику тем более естественным, что эксперимент Майкельсона в девяти случаях из десяти является единственным отрицательным экспериментом, с которым он знаком. В результате он

предполагает, что теория Эйнштейна — не что иное, как дикое предположение, основанное на одном из тех чрезвычайно деликатных экспериментов, в которых вероятность ошибки всегда велика. На самом деле, рассуждая таким образом, критик упускает из виду всю *суть* теории. Можно с уверенностью сказать, что даже если бы эксперимент Майкельсона никогда не проводился, теория Эйнштейна все равно появилась бы (хотя, конечно, если бы эксперимент Майкельсона дал положительный результат, позволяющий нам измерить нашу скорость в эфире, теория относительности была бы несостоятельной).

Это объясняет, почему, представляя теорию, мы начали с того, что показали, как она возникла как необходимое следствие нерелевантности абсолютной скорости во всех электромагнитных экспериментах, а значит, вытекала из инвариантности уравнений электродинамики, которая математически выражает совокупность всех отрицательных результатов. Если читатель понял значение этих преобразований Лоренца-Эйнштейна, мы можем перейти к рассмотрению некоторых их конкретных последствий и показать, как, помимо отрицательных экспериментов, теория относительности прояснила ряд неясных моментов в нашем понимании электромагнетизма.

Например, мы упомянули, что заряженное тело в покое окружено электрическим силовым полем, тогда как то же тело в движении (или электрический ток) окружено как электрическим, так и магнитным полем. Ампер дал формулу, описывающую распределение и интенсивность электромагнитного поля, окружающего электрический ток любой заданной интенсивности. Но эта формула была чисто эмпирической, и считалось, что мы должны были бы предвидеть существование этого электромагнитного поля и вывести точное выражение его расположения и величины чисто рациональными методами. Эти надежды не оправдались, поскольку, казалось, не было никакой рациональной связи между полем, создаваемым заряженным телом в состоянии покоя, и его полем в движении.

Сравните наше незнание в этом вопросе с нашей способностью понимать природу других проблем, связанных с относительным движением. Например, монохроматический источник света в состоянии покоя выглядит желтым, тогда как при движении к нам с достаточно высокой скоростью он выглядит зеленоватым. Но в этом изменении цвета нет ничего загадочного; мы могли бы предвидеть его, зная о волновых свойствах света. Ситуация была гораздо более неясной в случае электромагнетизма.

Теория Эйнштейна решает всю проблему. Рассмотрим простой случай заряда, движущегося с постоянной скоростью. Мы сказали, что благодаря своему движению он создает магнитное поле (так же, как ток), в дополнение к своему электрическому полю. Но в теории Эйнштейна скорость через эфир не имеет смысла; следовательно, не существует такого понятия, как заряд, движущийся с постоянной скоростью в абсолютном смысле. Если бы мы поспешили за заряженным телом и сопровождали его в его движении, то, согласно Эйнштейну, оно перестало бы быть движущимся зарядом и стало бы зарядом, находящимся в покое в нашей системе отсчета; но тогда его прежнее магнитное поле обязательно исчезло бы, оставив только электрическое поле. Поэтому мы должны предположить, что появление магнитного поля возникает только потому, что мы изменили нашу галилееву систему отсчета, перейдя от фиксированной по отношению к заряду к системе, *находящейся в относительном движении*.

Теперь преобразования Лоренца-Эйнштейна говорят нам, как изменяются наши измерения пространства и времени в этих условиях; и, применяя преобразования к уравнениям электродинамики, мы можем установить, как электрическое поле, которое является чисто электрическим, если смотреть из одной системы отсчета, будет выглядеть для нас, если смотреть из другой галилеевой системы отсчета. Продолжая в этом духе, мы

действительно обнаруживаем, что электрическое поле заряженного тела в покое будет выглядеть как электромагнитное поле, когда тело находится в относительном движении. Аналогичным образом получается точная математическая формула для нового поля, что, кстати, доказывает, что наша классическая эмпирическая формула была лишь приближительной. Таким образом, наконец-то получено рациональное обоснование появления магнитного поля вокруг движущегося заряженного тела, и это поле представляется прямым следствием изменений в тех фундаментальных формах восприятия пространства и времени, которые выражаются преобразованиями Лоренца-Эйнштейна.

Точно так же движущийся магнитный полюс создает вокруг себя электрическое поле в дополнение к своему магнитному полю в состоянии покоя, и именно это явление дает начало электромагнитной индукции, на которой основаны наши генераторы и динамо-машины. И в этом случае преобразования Лоренца-Эйнштейна проливают полный свет на данный вопрос.^[47]

В общем случае преобразования показывают нам, что поле, которое в одной галилеевой системе отсчета кажется исключительно электрическим или исключительно магнитным, в другой системе отсчета будет казаться электромагнитным, что заставляет нас признать относительность электрических и магнитных сил. В свое время мы увидим, что эта относительность сил является общей.

Рассмотрим другой тип явления, который также объясняется преобразованиями. Мы имеем в виду коэффициент конвекции Френеля, проиллюстрированный экспериментом Физо. Эксперимент доказывает, что луч света, проходящий через текущую воду, не переносится водой целиком, а немного отстаёт. Лоренц, который, хотя и открыл преобразования, не признавал их общей действительности, пытался объяснить это явление, постулируя подходящую электронную структуру воды. Но Эйнштейн, просто применив преобразования, без необходимости обращаться к нашим весьма проблематичным знаниям о точном электронном строении материи, обнаружил, что они с удивительной точностью предвосхищают результат Физо; ведь согласно преобразованиям, скорости *не* складываются как числа, как это было в классической науке. Отсюда следует, что скорость света относительно трубки обязательно должна быть меньше скорости света в воде плюс скорость воды в трубке.^[48]

Рассмотрим еще раз сокращение Фицджеральда. Здесь Лоренц счел допустимым применить преобразования, но из-за небольшой разницы в их значении в его теории он пришел к выводу, что движущееся тело действительно сокращается из-за своего реального движения через эфир. Хотя наблюдатель, движущийся вместе с телом, не мог обнаружить сокращение, оно было физически реальным и могло быть наблюдаемо наблюдателем, находящимся в покое в эфире. Аналогичная интерпретация по Лоренцу () должна быть применена к замедлению явлений. В теории Лоренца трудность заключалась в объяснении идентичного сокращения, проявляющегося одинаково для всех тел, мягких или твердых. Лоренц снова обращается к электронной и атомной структуре материи и должен принимать во внимание упругие силы.

У Эйнштейна объяснение простое. Сокращение обусловлено исключительно изменением наших измерений пространства и времени в результате относительного движения и совершенно не зависит от твердости или мягкости тела, атомная или электронная структура которого не должна приниматься во внимание. Точно так же объект выглядит увеличенным под микроскопом, и это увеличение не зависит от природы тела.

Короче говоря, изменения обусловлены вариациями (в результате относительного движения) в наших измерениях и восприятии пространства и времени, и в каждом случае

они не имеют отношения к микроскопическому строению материи. Таким образом, мы видим, что в том, что касается всех этих любопытных изменений, теория Эйнштейна не требует каких-либо особых знаний о микроскопическом строении и скрытых механизмах, которые, как предполагается, лежат в основе материи. В этом заключается одно из главных преимуществ теории Эйнштейна перед теорией Лоренца; ведь мы очень мало знаем о загадочной природе электричества и материи, и если бы весь прогресс был остановлен до получения таких знаний, нам, возможно, пришлось бы ждать много дней безрезультатно.

Одна из главных трудностей, сопутствующих атомистической теории, такой как теория Лоренца, была связана именно с этой интерпретацией наблюдаемых эффектов с точки зрения невидимых, о которых практически ничего не было известно и где на каждом этапе приходилось прибегать к *специальным* гипотезам. Что касается математических трудностей, то они, конечно, росли пропорционально сложности скрытых механизмов, которые мы должны были постулировать. Теория Эйнштейна, таким образом, является возвратом к универсальным принципам, выведенным из экспериментов, и в этом отношении аналогична физике общих принципов, появившейся в XIX веке. И вновь такие всеобъемлющие универсальные принципы, как энтропия, принцип наименьшего действия, закон сохранения энергии, массы и импульса, заняли место скрытых механизмов, с помощью которых атомисты пытались объяснить наблюдаемые явления.

Эти периодические колебания в научной точке зрения всегда были вызваны непрерывным прогрессом знаний. Обе позиции плодотворны и принесли важные результаты. В данном случае Лоренц продвинулся так далеко, как это было возможно, в своих спекуляциях о скрытых механизмах, и теория, подобная теории Эйнштейна, была необходимым противоядием от растущих трудностей, которые мешали дальнейшему развитию.

Теперь мы должны рассмотреть некоторые важные последствия теории Эйнштейна, которые влияют на наши традиционные представления о пространстве и времени. Сокращение Фицджеральда больше не является реальным физическим сокращением, как предполагалось в теории Лоренца (). Оно больше не возникает в результате совершенно конкретного движения тела через неподвижный эфир; неподвижный эфир, по отношению к которому скорость приобрела свое значение, был исключен Эйнштейном (). Сокращение Фицджеральда теперь обусловлено исключительно относительным движением между наблюдателем и наблюдаемым телом.

Если наблюдатель остается привязанным к телу, сокращения не происходит; если наблюдатель движется относительно тела или тело движется относительно него, возникает сокращение Фицджеральда. Если наблюдатель снова изменяет свою скорость относительно тела, сокращение Фицджеральда тела также изменится по величине. С телом ничего не произошло, но его длина изменилась. Очевидно, что физическая длина не является тем, чем мы когда-то ее считали; она ни в коем случае не может быть имманентной телу, поскольку тело не имеет определенной длины, пока не будет определено относительное движение наблюдателя. Таким образом, длина является лишь выражением отношения между наблюдателем и наблюдаемым, и оба участника этого отношения должны быть определены, прежде чем длина сможет иметь какой-либо смысл.

Точно так же цвет опала не имеет значения. Он красный отсюда, зеленый оттуда, синий откуда-то еще, и все же опал не изменился. Изменилось наше положение по отношению к опалу, и цвет опала неопределен до тех пор, пока мы не определим наше относительное положение. Другими словами, длина и цвет опала выражают отношения, а не имманентные характеристики.

Аналогичные соображения применимы к замедлению времени. Продолжительность и время являются лишь относительными понятиями, выражением отношений и не имеют абсолютного значения *сами по себе*. Это не означает, что продолжительность, которую мы ощущаем, является мифом, поскольку наше сознание всегда сопровождает наше человеческое тело, куда бы мы ни пошли, и мы всегда испытываем один и тот же поток времени. Все, что подразумевается, это то, что этой скорости течения времени нельзя придавать какое-либо уникальное значение в природе, и сравнение течений времени, характерных для различных галилеевых систем отсчета, покажет различия в скорости течения.

Мы упоминали в другом месте еще одну иллюстрацию относительности, когда обсуждали электрические и магнитные силы. Мы показали, как электрическое поле как таковое было неопределенным; как в зависимости от наблюдателя оно представлялось бы собой чисто электрическое или электромагнитное поле. Поскольку все эти условия наблюдения находятся на равных, нет смысла различать кажущиеся поля и реальные поля, кажущиеся длины и реальные длины, кажущиеся продолжительности и реальные продолжительности. Все эти понятия сами по себе являются лишь призраками, которым можно придать сущность только при уточнении условий наблюдения.

Некоторые философы-дилетанты были сбиты с толку постоянными упоминаниями наблюдателя в теории Эйнштейна и предположили, что все происходит в сознании наблюдателя, а внешний объективный мир науки не играет никакой роли.^[49] Но такая крайне идеалистическая интерпретация не может быть оправдана.

Слово «наблюдатель» является очень расплывчатым термином и не обязательно означает живого человека. Мы могли бы заменить глаза наблюдателя фотоаппаратом, его измерение времени часами — фактически, все его чувства и измерения — подходящими приборами регистрации, показания которых любой человек, находящийся в любой системе отсчета, мог бы проверить позже. Результаты остались бы прежними.

Теперь можно опасаться, что с исчезновением абсолютности таких фундаментальных форм восприятия, как продолжительность и расстояние, весь объективный мир науки погрузится в тень; а без общего объективного мира наука станет невозможной. Однако нам не нужно бояться такой катастрофы, поскольку, как будет объяснено на следующих страницах, новый общий объективный мир пространства-времени займет место классического мира пространства и времени (). Но даже на нынешнем этапе, не прибегая к пространству-времени, мы можем видеть, что объективность не отрицается по следующим причинам:

Когда два разных галилеевых наблюдателя измеряют один и тот же объект или время продолжительности одного и того же явления, их вычисления будут различаться в соответствии с правилами, указанными в преобразованиях Лоренца-Эйнштейна. Отсюда следует, что наблюдатели могут сделать вывод, что они обсуждают одни и те же объекты, *не* когда их соответствующие измерения согласуются в соответствии с классическими стандартами абсолютного расстояния и продолжительности, а когда они согласуются с новыми стандартами, установленными преобразованиями Лоренца-Эйнштейна. Таким образом, определенный критерий объективности все же возможен, хотя его форма отличается от формы классической науки. Таким образом, несмотря на неопределенность понятий, на которых была основана классическая наука (пространство, время, сила, масса), теория Эйнштейна не лишает нас возможности представить себе существование общего внешнего мира.

Даже на данном этапе сказано достаточно, чтобы показать, что теория Эйнштейна не может считаться просто математической фантазией. Необычайные трудности, с которыми столкнулась классическая наука из-за отрицательных результатов упомянутых нами экспериментов (и из-за множества других проблем), исчезли. Вместе с ними исчезли и чудесные компенсации, к которым Лоренц был вынужден прибегнуть, чтобы объяснить эти отрицательные результаты. Полная относительность галилеева движения объясняет все наши проблемы. Природа больше не является капризной, но эфир или пространство являются относительными для галилеева движения. Мы не смогли распознать эту относительность, которая была у нас перед глазами; тем самым мы сами стали создателями наших трудностей. Однако, вместо того чтобы отказаться от классических концепций пространства и времени, физики в целом отказались следовать за Эйнштейном. Сегодня критика утихла (со стороны подавляющего большинства ученых), поскольку эксперимент за экспериментом подтверждал предсказания Эйнштейна. Однако большинство экспериментов касалось последствий теории, а не ее основ. Эксперименты де Ситтера и Майораны заполнили этот пробел, доказав, что луч света всегда проходит мимо наблюдателя с одинаковой неизменной скоростью, независимо от относительной скорости наблюдателя и источника.

Одной из самых важных критических замечаний в адрес теории Эйнштейна является то, что она лишает нас возможности представить себе объективный эфир. Нет ни малейшего сомнения в том, что теория Эйнштейна заставляет нас отказаться от нашего представления о неподвижном эфире классической науки, по отношению к которому можно было измерить движение. Но это не совсем то же самое, что утверждать, что теория полностью исключает эфир. Тем не менее, на первый взгляд, тот факт, что каким бы ни было наше галилеево движение, эксперименты, проводимые в нашей системе отсчета, всегда будут давать одинаковые результаты, кажется, отсылает эфир в царство призраков, делая его бесполезной гипотезой. Если бы это было так, мы больше не могли бы представлять себе электромагнитные поля и лучи света как выражение состояний эфира, но должны были бы рассматривать эти поля как составляющие независимые реальности какой-то новой категории, отличные от материи, но способные существовать в пространстве без поддержки носителя или без того, чтобы быть простыми проявлениями его состояний. Однако в общей теории, которую мы обсудим во второй части этой книги, мы увидим, что эфир восстанавливается в виде метрического поля пространства-времени. Но поскольку этот новый эфир имеет общее с неподвижным эфиром Лоренца только название, не представляется большого смысла сохранять старое название.

Если же мы хотим подчеркнуть большое различие между классическим и релятивистским взглядами, мы должны сказать: «Согласно классической науке, скорость световых волн и электромагнитных волн в целом постоянна во всех направлениях по отношению к неподвижному эфиру, а значит, и по отношению к тому конкретному наблюдателю, который находится в состоянии покоя по Галилею в неподвижном эфире. Согласно релятивистской точке зрения, скорость световых волн постоянна во всем пустом пространстве, если измерять ее любым галилеевым наблюдателем, то есть любым наблюдателем в любой не ускоренной системе отсчета» (такие системы отсчета распознаются по отсутствию всех центробежных или инерционных толчков и тяг).

На данный момент мы не в состоянии предсказать, что произойдет, если наблюдатель, вместо того чтобы находиться в галилеевой системе отсчета, будет находиться в негалилеевой, то есть ускоренной или вращающейся системе отсчета. Все утверждения, которые мы сделали до этого момента, касаются только галилеевых наблюдателей. Таковы ограничения, которые налагают на нас специальный принцип и специальная теория

относительности. Очень важно понять этот факт, поскольку многие критические замечания в адрес теории Эйнштейна связаны с непониманием этого момента. В нынешнем виде теории ускорение и вращение остаются абсолютными и поэтому исключаются из специального принципа относительности, который относится исключительно к относительным движениям в пространстве. Это галилеевы движения.

Возможно, конкретный пример поможет прояснить эти моменты. Рассмотрим, например, последний эксперимент Майкельсона (не тот, который стал знаменитым) или эксперимент Саньяка. Суть обоих этих экспериментов заключается в том, чтобы показать, что лучу света, движущемуся вокруг Земли в направлении ее вращения, требуется больше времени, чтобы вернуться в исходную точку, чем лучу, движущемуся в противоположном направлении. Очевидно, что скорость световых волн по отношению к Земле не одинакова во всех направлениях, поэтому мы можем обнаружить вращение Земли, на которой мы стоим. Затем критик делает вывод, что принцип относительности Эйнштейна опровергается экспериментом. Но критик не понимает, что обнаруженное движение является вращением, а значит, ускорением, и что специальный принцип Эйнштейна ограничивается отрицанием какого-либо значения абсолютных скоростей, то есть движений, которые не являются ускоренными. Если бы это было не так, принцип Эйнштейна был бы несостоятелен, поскольку общеизвестно, что множество экспериментов (маятник Фуко, гироскоп и т. д.) способны выявить вращение Земли. *Эксперимент упорно отказывается выявлять именно абсолютную скорость, а не ускорение.*

Очень похожая критика заключается в утверждении, что, поскольку скорость света по отношению к поверхности Земли больше с востока на запад, чем с запада на восток, постулат об инвариантной скорости света опровергается. Но и в этом случае речь идет об одной и той же ошибке. Постулат гласит, что скорость света является инвариантной в любой *галилеевой системе отсчета*, когда она измеряется наблюдателем в этой системе. Постулат перестает быть верным в ускоренной системе отсчета, а вращающаяся Земля действительно представляет собой ускоренную систему отсчета. Правда, в отрицательных экспериментах Земля рассматривалась как галилеева система отсчета, но всегда указывалось, что это отношение было лишь приблизительно верным и что можно было разработать эксперименты для обнаружения ускорения Земли. Однако эффекты, вызванные абсолютной скоростью Земли (которая тогда считалась существующей), были бы настолько более выраженными, чем эффекты, вызванные ускорением, что в первом приближении мы могли бы пренебречь этими более слабыми эффектами ускорения.

Есть еще один момент, на котором мы должны настаивать, поскольку он вызвал ряд критических замечаний. Ньютоновский принцип относительности гласил, что скорость движения материи в пустом пространстве не имеет смысла или является относительной. Специальная теория относительности Эйнштейна, с другой стороны, заставляет нас рассматривать скорость света как абсолютную. Как же тогда специальный принцип Эйнштейна может быть простым расширением ньютоновского принципа на электродинамику или эфир?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны понимать, что, хотя скорость была относительной в науке Ньютона, все же существовала одна определенная скорость, которая считалась абсолютной (). Это была бесконечная скорость. Предполагалось, что скорость, которая была бесконечной или мгновенной для одного наблюдателя, оставалась бы бесконечной или мгновенной для всех других наблюдателей. Таким образом, что касается скорости, единственное различие между Эйнштейном и Ньютоном заключается в том, что у Эйнштейна абсолютная или неизменная скорость больше не является бесконечной. Хотя она очень велика (186 000 миль в секунду), теперь она конечна. Именно это различие между

неизменными скоростями Ньютона и Эйнштейна является причиной всех основных различий между классической и эйнштейновской наукой, как будет более подробно объяснено в следующей главе. В частности, именно эта конечность неизменной скорости не позволяет нам придавать какое-либо абсолютное значение форме и расстоянию.

Рассматривая этот вопрос с другой стороны, мы должны заметить, что на самом деле ньютоновский принцип относительности просто утверждает, что скорость *материи по отношению к материи* имеет физическое значение. Скорость материи в пустом пространстве физически не имеет значения. То же самое и в специальном принципе Эйнштейна. Теория Эйнштейна доказывает (см. следующую главу), что молярная материя никогда не может двигаться с абсолютной скоростью света. Поэтому мы вполне обоснованно можем сказать, что скорость материи остается по сути относительной, поскольку она никогда не может достичь той критической скорости (т. е. скорости света), которая является абсолютной.

ГЛАВА XIV

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

В предыдущей главе мы видели, что переменные времени и пространства, входящие в преобразования Лоренца-Эйнштейна, следует считать абсолютно общей величиной. Предполагалось, что они представляют собой продолжительность, фактически ощущаемую и переживаемую наблюдателем, а также пространственные измерения, фактически определяемые его жесткими стержнями в его галилеевой системе отсчета. Это уже не был случай, как в теории Лоренца, когда предполагалось, что эти пространственные и временные переменные применимы только в определенных электромагнитных случаях, а в других — нет. Теперь они имели абсолютно общее применение и, в частности, должны были действовать для всех механических явлений.

Но это осознание поставило нас перед особой трудностью. Фундаментальный постулат Эйнштейна заключался в том, что галилеево движение не имеет смысла или, по крайней мере, никогда не может быть обнаружено экспериментально — будь то механического или электромагнитного характера. Теперь полная относительность галилеева движения выражается математически инвариантностью формы законов природы для преобразований, соответствующих этому типу движения. Классические законы механики удовлетворяли этому требованию в классической науке, поскольку они оставались инвариантными при подвергании классическим преобразованиям. Но если мы принимаем взгляды Эйнштейна, эти законы должны оставаться инвариантными не по отношению к классическим преобразованиям, а по отношению к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна.

Классические законы механики не удовлетворяли этому новому условию инвариантности. Из этого следовало бы, что относительность галилеева движения, которую Эйнштейн успешно установил для электродинамических и оптических экспериментов, могла быть сохранена только ценой отказа от этой же относительности для механических экспериментов. То, что было выиграно с одной стороны, было потеряно с другой. Поскольку законы механики, безусловно, должны были оставаться инвариантными по отношению к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна, если абсолютная скорость должна была оставаться бессмысленной, и поскольку классические законы не удовлетворяли этому условию, был только один выход из этой затруднительной ситуации. Необходимо было предположить, что классические законы были неверны.

Соответственно, Эйнштейн был вынужден модифицировать классические законы механики таким образом, чтобы обеспечить их инвариантность по отношению к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна. Затем было обнаружено, что эта модификация влечет за собой относительность массы. Под этим мы подразумеваем, что масса данного тела больше не может рассматриваться как инвариантная величина, независимая от относительного движения тела. Напротив, теперь было обнаружено, что она увеличивается с относительной скоростью тела, становясь бесконечной при достижении скорости света. Таким же образом была установлена относительность силы, и классическая ньютоновская механика с ее инвариантностью массы и силы была признана неверной и приемлемой только в качестве первого приближения для низких скоростей.

Из этого также следовало, что ни одно материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей или равной скорости света, поскольку для достижения этой

критической скорости потребовалась бы сила бесконечной величины. Ряд парадоксов, связанных с этой теорией, обусловлен исходным предположением критика о том, что наблюдатель движется со скоростью света. Но все эти парадоксы можно отбросить с самого начала, поскольку ни один наблюдатель не может двигаться с такой скоростью.

При рассмотрении математического выражения массы тела, находящегося в относительном движении, было обнаружено, что оно может быть разложено на несколько частей. Прежде всего, мы имели массу тела в состоянии покоя (это была масса, которую классическая наука считала неизменной, *т. е.* независимой от движения тела). К этому добавлялась *vis viva*, или энергия движения тела по отношению к наблюдателю, а также ряд других слагаемых, зависящих от относительной скорости. Однако последние слагаемые имели очень незначительное значение, если относительное движение тела не было значительным. Таким образом, масса тела, находящегося в относительном движении, увеличивалась по сравнению с его массой в состоянии покоя за счет его энергии движения или *vis viva*, так что различие между массой и энергией становилось неясным.

Поскольку часть массы тела в движении была обусловлена его *vis viva*, казалось вероятным, что вся масса тела, как в покое, так и в движении, была обусловлена его энергией того или иного вида. Теперь было известно, что даже в состоянии покоя материя содержит энергию, о чем свидетельствуют радиоактивные явления и тепловые эффекты, вызываемые химическими соединениями. Поэтому было естественно предположить, что масса тела в состоянии покоя обусловлена содержащейся в нем или связанной энергией, которая будет высвобождена, если тело распадется на частицы. Формула, связывающая эту энергию состава тела с его массой, была получена из математического выражения массы, и было обнаружено, что в единицах С.Г.С. содержащаяся энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Из этой формулы легко понять, какое огромное количество энергии будет высвобождено и какие страшные последствия повлечет за собой полное распадение даже небольшого участка материи.

Другим следствием этих открытий было то, что любое изменение внутренней энергии тела, находящегося в покое, например, в результате его сжатия, нагрева или электризации, сопровождалось бы увеличением его массы в покое.^[50] Это открытие позволило нам объяснить любопытное несоответствие в сравнительных массах гелия и атома водорода, загадку, которую классическая наука никогда не могла объяснить.

Для иллюстрации: ядро атома водорода состоит из одного протона, а ядро атома гелия состоит из четырех протонов, удерживаемых вместе двумя электронами. Поскольку только протоны имеют значимую массу, казалось логичным предположить, что масса атома гелия будет в четыре раза больше массы атома водорода. Однако точные измерения доказали, что имеется небольшой дефицит и что масса атома гелия меньше, чем в четыре раза масса атома водорода. Классическая наука признавала, что чем плотнее электроны и протоны сгруппированы в ядре, тем меньше будет электрическая энергия атома, но объяснить дефицит массы казалось невозможным. Теория относительности, отождествляя массу и энергию, дала очевидное решение этой проблемы. Недостаток массы атома гелия можно было объяснить потерей энергии, излучаемой в виде тепла и света, когда электроны и протоны сжимались. В то же время стало возможным точно рассчитать по потере массы точное количество выделенной энергии. Отсюда следовало, что в тех областях космоса, где атомы гелия находились в процессе образования в результате группирования протонов и электронов, постоянно излучались бы огромные количества тепла и света. Это следствие теории позволило астрофизикам объяснить огромную температуру Солнца, которая поддерживается на протяжении миллиардов лет, несмотря на непрерывное излучение в

холодном пространстве. Атомы гелия постоянно образуются в Солнце, и в этом факте заключается источник его, по-видимому, неисчерпаемого запаса энергии.

Благодаря этому постоянному излучению энергии Солнце и звезды постепенно теряют свою массу, поскольку свет, конечно же, является одной из форм энергии. Как таковой, свет должен обладать массой и импульсом () и оказывать давление на тела, на которые он попадает. Это давление, в действительности, не было неизвестным, поскольку оно следовало из уравнений Максвелла и было экспериментально подтверждено Лебедевым, Николсом и Халлом. Фактически, именно этому давлению света, как предполагалось, было обусловлено явное отталкивание хвостов комет от Солнца. Тем не менее, хотя это и не было новым открытием, тот факт, что теория Эйнштейна предполагала наличие импульса у света, стал одним из многих косвенных подтверждений этой теории.

Часто высказываемое не математиками возражение заключается в следующем: они утверждают, что, поскольку энергия, движущаяся со скоростью света, должна обладать бесконечной массой, мы должны быть раздавлены под огромным воздействием падающих на наши тела лучей света. В элементарной книге такого рода мы не можем вдаваться в математические детали, но можем сказать, что этот аргумент является ошибочным. Только материя, состоящая из *связанной энергии*, становится бесконечной по массе при движении со скоростью света. Лучи света представляют собой другой тип энергии, известный как *свободная* или *независимая энергия*, и расчеты показывают, что импульс, создаваемый этой формой энергии, движущейся со скоростью света, не является бесконечным, а чрезвычайно мал.

Конечно, теория относительности не является теорией чистой математики. Эйнштейн не был заинтересован исключительно в манипулировании уравнениями и законами, чтобы они вписывались в его схему. Окончательный вердикт о правильности теории математической физики всегда должен оставаться за экспериментатором, и оставалось выяснить, соответствуют ли уравнения механики Эйнштейна фактам более точно, чем классические уравнения. Можно утверждать, что самые точные эксперименты доказали правильность законов механики Эйнштейна, и эксперимент Бухерера, доказывающий увеличение массы быстро движущегося электрона, является тому наглядным примером.⁽¹⁵¹⁾

К настоящему моменту должно быть ясно, что теория Эйнштейна отличается от теории Лоренца очень важными различиями. Лоренц также вывел из своей теории, что масса электрона должна увеличиваться и становиться бесконечной, когда его скорость приближается к скорости света; но речь шла о скорости электрона в неподвижном эфире, тогда как в теории Эйнштейна это просто скорость по отношению к наблюдателю. Согласно Лоренцу, увеличение массы движущегося электрона было связано с его деформацией или сокращением по Фитцджеральду. Сокращение изменяло расположение электромагнитного поля вокруг электрона, и именно из этого изменения, как предполагалось, возникало увеличение массы, наблюдаемое Бухерером. Однако в теории Эйнштейна увеличение массы является абсолютно общим явлением и не обязательно связано с электромагнитным полем движущегося электрона. Обычный незаряженный кусок материи, такой как песчинка, увеличил бы свою массу в точно такой же пропорции; и для предсказания этих эффектов, которые являются прямым результатом преобразований пространства и времени, не требуется знание микроскопического строения материи.

Кроме того, тот факт, что это увеличение массы движущейся материи теперь обусловлено относительным движением, а не движением через неподвижный эфир, как в теории Лоренца, значительно меняет всю картину. Согласно Лоренцу, масса электрона действительно увеличивалась, поскольку его движение через эфир оставалось реальностью. Согласно Эйнштейну, масса электрона увеличивается только в той мере, в какой он находится в относительном движении по отношению к наблюдателю. Если бы наблюдатель был привязан к летящему электрону, увеличения массы не произошло бы; именно оставшийся позади электрон теперь казался бы увеличенным. Таким образом, масса, как и расстояние, продолжительность и электромагнитное поле, является относительной величиной (), не имеющей определенного значения сама по себе и существенно зависящей от условий наблюдения.

Благодаря общей действительности преобразований Лоренца-Эйнштейна, их можно применять ко всем видам явлений. Таким образом, было обнаружено, что температура, давление и многие другие физические величины оказались относительными. С другой стороны, энтропия, электрический заряд и скорость света *в вакууме* оказались абсолютными, превосходящими движение наблюдателя. Позже мы увидим, что ряд других величин также являются абсолютными, наиболее важной из которых является абстрактная математическая величина, называемая *интервалом Эйнштейна*, которая играет столь важную роль в структуре нового объективного мира науки, мира четырехмерного пространства-времени.

ГЛАВА XV

ПОСЛЕДСТВИЯ НОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ — СОВРЕМЕННОСТЬ

В предыдущих главах мы постарались показать, как фундаментальные посылки Эйнштейна — относительность галилеева движения в пространстве или эфире и постулат об инвариантной скорости света — были сформулированы в результате индукции из сверхточных экспериментов. После принятия этих постулатов все странные следствия специальной теории получаются дедуктивно с помощью элементарных математических рассуждений.

Учитывая чрезвычайную важность этой проблемы, давайте вспомним, что постулат об инвариантной скорости света предполагает, что луч света *в вакууме* будет проходить через любую галилееву систему отсчета с одинаковой инвариантной скоростью *с* во всех направлениях, при условии, что эта скорость измеряется наблюдателем, находящимся в покое в этой системе отсчета, *а не каким-либо другим наблюдателем в другой системе отсчета, будь то галилеева или ускоренная.*^[52] И здесь мы должны напомнить, что классическая наука, веря в абсолютность времени, предполагала, что события, происходящие «сейчас» в любой точке пространства, будут продолжаться одновременно, независимо от движения наблюдателя. Это убеждение было равносильно предположению, что распространение, движущееся с бесконечной скоростью по отношению к одному наблюдателю, будет также продвигаться с бесконечной скоростью, если измерять его любой другой наблюдатель. Другими словами, бесконечная скорость была абсолютной; она составляла неизменную скорость классической науки. Науке не было известно о таком физическом распространении, хотя предполагалось, что гравитация может быть такого типа. В любом случае, классическая наука концептуально признавала существование этой

бесконечной неизменной скорости. Это подразумевало существование галилеевых преобразований, а значит, и обычных законов сложения скоростей. Поскольку все измерения с помощью жестких стержней и часов, таких как колеблющиеся атомы, подтверждали предположения классической науки, по крайней мере, насколько это можно было обнаружить с помощью грубых наблюдений, классическая позиция казалась оправданной *апостериорно*, даже несмотря на то, что гипотеза абсолютного времени не имела *априорного* обоснования.

Теперь, в теории относительности, Эйнштейн просит нас согласиться с тем, что определенная конечная инвариантная скорость, которая оказывается скоростью света в вакууме, должна считаться инвариантной для всех галилеевых наблюдателей.^[53] Таким образом, как объяснялось ранее, мы приходим к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна, непосредственным следствием которых является то, что молярная материя никогда не может двигаться со скоростью, превышающей или равной скорости света. Это само по себе достаточно, чтобы исключить из рассмотрения наблюдателей, движущихся с такими скоростями.

Но предположим, что для целей аргументации мы хотим рассмотреть, пусть даже чисто концептуально, скорость, превышающую скорость света, — в частности, скорость, которая представляла бы собой бесконечную скорость для любого определенного галилеева наблюдателя. Как такая скорость проявилась бы для другого галилеева наблюдателя, движущегося относительно первого? Единственный момент, который необходимо подчеркнуть, заключается в том, что эта бывшая бесконечная скорость никогда не могла бы быть инвариантной, не вступая в противоречие с инвариантностью скорости 186 000 миль в секунду. Это становится очевидным, если учесть, что, согласно классической науке, если мы добавим любую скорость — скажем, скорость света — к бесконечной скорости, мы получим бесконечную скорость; тогда как в теории Эйнштейна мы получим скорость света. Отсюда следует, что предпосылки классической науки и теории относительности несовместимы. Поскольку мы предлагаем обсудить теорию Эйнштейна, мы откажемся от классического представления о неизменности бесконечной скорости.

Отныне неизменная скорость Вселенной будет равна c , или 186 000 миль в секунду. Что касается бесконечной скорости, то теперь она станет относительной: бесконечной для одного наблюдателя и конечной для другого. На первый взгляд очевидно, что если бы наши измерения пространства и времени были такими, какими их считала классическая наука, то луч света не мог бы проходить мимо нас с одинаковой скоростью, независимо от того, мчимся ли мы к нему или убегаем от него. Однако простой математический расчет показывает нам, что мы можем сделать результаты наших измерений совместимыми с постулатом инвариантности, если признаем, что наши измерения пространства и времени немного отличаются от того, что предполагала классическая наука. Это чисто математическая проблема, которая может быть решена математическими средствами. Она приводит нас, конечно, к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна; и из этих преобразований легко увидеть, что относительно движущиеся стержни должны укорачиваться, продолжительность явлений удлиняться, а одновременность пространственно разделенных событий нарушаться.

Поскольку предпосылки Эйнштейна являются последовательными (что можно доказать математически), не может возникнуть никаких вопросов относительно последовательности выводов Эйнштейна; предпосылки и выводы должны быть либо верны все вместе, либо

неверны все вместе. Таким образом, основная проблема заключается в анализе обоснованности теории с точки зрения ее способности отражать реальный мир физических явлений. Некоторые критики-неспециалисты, такие как Бергсон, встревоженные революционным характером открытий Эйнштейна и движимые желанием сохранить свою классическую веру в абсолютную природу одновременности, остающейся одинаковой для всех наблюдателей, пытались отстаивать эту промежуточную точку зрения. Они утверждали, что с чисто математической точки зрения системы измерения относительности могут придать большую простоту чисто математической обработке уравнений электродинамики, но ни в коем случае нельзя предполагать, что предсказания теории могут когда-либо соответствовать тому, что мы действительно измеряем с помощью жестких стержней и обычных часов. Мы можем сразу отвергнуть эту точку зрения. Если бы она была верна, ни одно из физических предсказаний теории Эйнштейна не было бы подтверждено физическими экспериментами.

Кроме того, теория Эйнштейна относится к математической физике, а не к чистой математике. Необходимо не только, чтобы выводы теории были математически согласуемы с исходными посылками. Они должны также приводить нас к предсказаниям, которые будут подтверждены экспериментами. Если бы они не соответствовали этому требованию, они все равно описывали бы работу возможного рационального мира, но сама теория, дающая ошибочные физические прогнозы, никогда не позволила бы нам предвидеть и предсказать, и ни один ученый никогда бы не подумал ее поддерживать. Короче говоря, мы должны признать, что если мы принимаем предпосылки Эйнштейна, мы должны предполагать, что измерения, проводимые с помощью естественных стержней и естественных часов, дадут прогнозы теории. Мы также должны помнить, что под естественными часами *мы не имеем в виду часы, настроенные произвольно*. Мы имеем в виду часы, такие как вибрирующие атомы, или, в более общем смысле, все периодические физические процессы, развивающиеся в состоянии изоляции. Точно так же под естественными стержнями мы имеем в виду наши обычные материальные стержни, поддерживаемые в одинаковых условиях температуры и давления.

Таким образом, тип измерительных приборов точно такой же, как и в классической науке; и все, что нам говорит теория относительности, это то, что если бы наши классические измерения проводились с большей точностью, мы бы давно поняли, что классические прогнозы опровергаются экспериментами. Нет смысла продолжать изучение теории, если мы не сможем понять ее физическое значение. Что касается математиков, то, поскольку преобразования Лоренца-Эйнштейна являются результатом сверхточных экспериментов, их математические последствия должны считаться соответствующими действиям реального мира; и эти последствия ясно указывают на то, что длина, продолжительность и одновременность должны быть относительными в реальном физическом смысле. Однако, учитывая важность новых идей, мы можем рассмотреть эту проблему косвенным образом и тем самым пролить дополнительный свет на конкретное значение этих преобразований.

Соответственно, нам придется обсудить, что физик понимает под «событием». Примером события может служить что-то, происходящее в определенной области пространства в определенный момент времени. Неважно, что именно происходит. Это может быть мысль, мелькнувшая в нашем уме, птица, запевшая песню, или столкновение двух бильярдных шаров; важно только определение положения в пространстве и времени.

Когда мы пытаемся представить себе событие, мы вынуждены приписывать ему более или менее определенную протяженность в пространстве и более или менее определенную продолжительность во времени. Но во всех задачах, где требуется точность локализации, мы должны представлять себе событие как идеально ограниченное мгновенной точкой в пространстве или, если предпочитаем, математической точкой в пространстве в математическом мгновении времени. Тогда мы получаем то, что Минковский назвал **«точечным событием»**. Эта процедура идеального ограничения событий, конечно, является чисто математической абстракцией и во всех отношениях похожа на процедуру, которой следует геометр, когда он говорит о точках без размеров, линиях без ширины или поверхностях без толщины.

Даже в повседневной жизни мы вынуждены следовать тому же методу идеального ограничения размеров, чтобы сделать возможным точное определение местоположения. Например, когда мы говорим, что находимся в стольких-то милях от Нью-Йорка, наше утверждение является чрезвычайно расплывчатым. О какой части Нью-Йорка мы говорим? Даже когда мы указываем конкретное здание в городе, всегда можно спросить: «О какой части здания идет речь?» Таким образом, мы видим, что для достижения любой степени точности мы должны выбрать определенную точку, и наше утверждение, что мы находимся в пятидесяти милях от Нью-Йорка, равносильно тому, что мы рассматриваем Нью-Йорк как точку. Конечно, мы прекрасно знаем, что город не сводится к точке, но аргументы такого рода не имеют отношения к проблеме локализации, с которой мы сталкиваемся.

То же самое и со временем. Событие длится, оно проявляет продолжительность; но для достижения точности мы должны представлять его как идеально ограниченное. Таким образом, мы получаем мгновенное событие, происходящее в определенной точке нашего пространства.

Таким образом, мы можем сказать, что бильярдный шар, неподвижно находящийся в одной точке пространства нашей системы отсчета, представляет собой непрерывную последовательность точечных событий, все из которых расположены в одной и той же точке нашего пространства (где само точечное событие будет представлено мгновенным существованием шара, рассматриваемого как уменьшенного в размере до пространственной точки). Точно так же бильярдный шар, движущийся в пространстве нашей системы отсчета, будет представлен последовательностью точек в пространстве в последовательности моментов времени, то есть цепочкой точечных событий.

Совершенно не обязательно представлять событие как нечто объективное, действительно происходящее или существующее. Мы можем представлять события и точечные события как пустые. Таким образом, точка нашего пространства, удаленная на миллион миль в определенном направлении в шесть часов, представляет собой точечное событие. Точно так же совершенно не обязательно обозначать точку на нашем листе бумаги карандашной отметкой, поскольку мы можем определить ее положение с помощью чисел. Однако в физике мы чаще всего интересуемся обсуждением наблюдаемых событий; поэтому, хотя в теории точечное событие является лишь локализацией абстрактного объекта в точке пространства в определенный момент времени, на практике большинство событий, к которым мы будем обращаться, будут служить для локализации наблюдаемых объектов (). По аналогичным причинам мы обычно окрашиваем бесцветную жидкость в термометре, чтобы сделать ее наблюдаемой; хотя, конечно, при этом ничего не меняется в показаниях прибора.

Перейдем теперь к проблеме определения одновременности событий. Как показывает обычный опыт, мы можем локализовать наши различные мысли и сенсорные впечатления во временном потоке нашего индивидуального сознания; и суждение о том, что два ощущения являются одновременными или следуют друг за другом, по сути своей является *априорным*, поскольку его невозможно проанализировать дальше. Однако наука никогда бы не существовала, если бы мы ограничивались регистрацией сенсорных впечатлений, не пытаясь их координировать и объяснять. Этим попыткам координации мы обязаны концепцией внешней вселенной пространства и времени (или пространства-времени, согласно современному взгляду) — общего объективного мира науки, в котором происходят события. Он объективен в том смысле, что мы можем представлять его как представляющий одинаковые отношения структуры для всех людей, а значит, как предсуществующий в качестве конкретного существа для ума, который его открывает и исследует по частям. Является ли эта объективная вселенная реальностью в метафизическом смысле (реальностью, которая была просто открыта нами) или, как утверждает большинство ученых, в конечном счете сводится к простому ментальному конструкту, продукту синтеза разума, — это вопрос, который не стоит рассматривать в данной главе. В любом случае физик может спекулировать на этой объективной вселенной, как если бы она была реальностью, предшествующей наблюдателю, который ее открывает.

Здравый смысл или элементарная наука привели к представлению об общей внешней объективной вселенной, в которой происходили внешние события, занимая определенные позиции в пространстве и времени. Эти внешние события, такие как взрыв бочки с порохом, считались причинами, ответственными за наши непосредственные сенсорные восприятия света и звука. Еще около трехсот лет назад считалось допустимым отождествлять момент времени, в который происходило внешнее событие, с точным психологическим моментом, в который это событие запечатлевалось в нашем сознании в виде звука или зрительного ощущения. Но эта очень грубая точка зрения привела к несоответствиям, когда стало ясно, что взрыв, произошедший рядом с нами и воспринятый нами как одновременное появление световых и звуковых впечатлений, выглядел бы как последовательность двух отдельных событий, сначала светового, а затем звукового, если бы мы находились в другом месте.

Если мы хотели сохранить нашу веру в возможность представления общей объективной вселенной, в которой одно событие оставалось одним событием независимо от положения наблюдателя, то становилось необходимым объяснить эти несоответствия, предположив, что передача звука от места к месту не была мгновенной. Однако по-прежнему считалось, что распространение света происходит мгновенно, так что, по крайней мере, моменты нашего визуального восприятия внешних событий можно было отождествить с моментами их возникновения в объективном мире. Например, триста лет назад было принято утверждать, что когда мы видели внезапное красное свечение звезды, мы были свидетелями звездной катастрофы, происходящей *там и сейчас*. Тогда казалось, что люди обладали таким же *априорным* интуитивным пониманием одновременности или последовательности событий во всем пространстве, которое, как показывал опыт, существовало в случае сенсорных впечатлений, расположенных в индивидуальных потоках сознания. Но, как отмечает Эддингтон, «эта примитивная вера была опровергнута в 1675 году знаменитым исследованием Рёмера о затмениях спутников Юпитера; и мы больше не имеем права локализовать внешние события в момент их визуального восприятия». После открытия Рёмера ученые были вынуждены проводить различие между моментом, когда произошло внешнее событие, и моментом, когда мы осознали его происхождение. Это открытие привело их к признанию того, что чистая интуиция не может дать нам надежной

информации о порядке последовательности и одновременности внешних событий во всем пространстве. Например, когда мы внезапно наблюдаем через телескоп какое-то звездное возгорание, у нас нет возможности непосредственно интуитивно определить, было ли это звездная катастрофа одновременна с подписанием перемирия, битвой при Ватерлоо или строительством пирамид. Точно так же, если бы мы наблюдали две звездные катастрофы, нам было бы невозможно *априори* определить, какая из них произошла раньше.

Итак, проблема определения местоположения внешних событий в общем пространстве и времени, или, согласно современному взгляду, в общем пространстве-времени, является одной из наиболее важных для изучающего природу. Поскольку прямая интуиция не помогает ему, то, если продолжительность и одновременность внешних событий в окружающем мире должны иметь какой-либо смысл, их можно определить только в результате некоторого соглашения, подобного тому, которое было выбрано для измерения пространства с помощью жестких материальных тел. Таким образом, цель физики заключалась в том, чтобы определить некоторые условные средства определения одновременности и последовательности внешних событий *таким образом, чтобы они были совместимы с существованием общей объективной вселенной.*

Наиболее очевидным методом достижения некоторого согласованного определения одновременности двух внешних событий было обращение к физическим распространениям, таким как распространение световых или звуковых волн, с учетом времени, необходимого для достижения нас этими распространениями.

Конечно, в повседневной жизни различия, которые ученый вынужден учитывать, очень часто не имеют большого значения. Например, когда мы ударяемся обоими голеними и осознаем психологическую одновременность болезненных ощущений, мы вполне оправдано предполагаем, что ударились одновременно. Только когда мы подвергаем подобный пример строгой логике научного мышления, это грубое представление становится теоретически несостоятельным, хотя, конечно, по-прежнему допустимым в качестве приближения.

Дело в том, что ушиб каждого из наших голени представляет собой внешнее событие,^[54] а наше осознание каждой из двух последующих болей, в свою очередь, представляет собой психологическое событие. Таким образом, мы должны принимать во внимание два внешних события и два психологических события. Мы не имеем права смешивать эти два вида событий, так же как мы не имеем права путать выстрел с попаданием в цель. В любом случае, между моментом, когда мы ударяемся об одну из наших голени, и моментом, когда мы осознаем боль, должен пройти определенный промежуток времени, пусть даже очень короткий. Физиологи, измерившие скорость нервных импульсов, могли бы точно сказать нам, сколько времени это занимает, измеренное по часам. Если у нас нет оснований утверждать, что нервные импульсы проходят с одинаковой скоростью по обеим ногам, и если ушибленные места на наших двух голених не находятся на одинаковом расстоянии от центра нашего сознания, наше интуитивное ощущение психологической одновременности двух ощущений боли не позволяет нам сделать вывод об одновременности двух внешних событий (удара наших голених о какой-то предмет). Однако на практике, как мы уже упоминали, мы можем пренебречь всеми этими тонкостями, поскольку наше психологическое восприятие одновременности в конце концов чрезвычайно грубо, и нет никакого смысла подвергать наши результаты корректировкам, имеющим сравнительно незначительное значение.

Тем не менее, хотя установленное нами различие не представляет практического интереса в рассматриваемом нами случае, оно имеет огромное теоретическое значение, как видно из следующего примера: Если бы мы смешали внешние события с нашим сознательным восприятием () их, мы могли бы утверждать, что гигант с ногами, дотягивающимися до звезд, который на мгновение коснулся солнца левым коленом, а Сириуса — правой ногой, осознал бы непосредственным интуитивным образом одновременность этих событий, поскольку все, что ему нужно было бы сделать, — это зарегистрировать одновременность двух сознательных впечатлений — двух ожогов. Но этот аргумент был бы ошибочным, поскольку в подобном случае, когда внешние события происходили на таком огромном расстоянии от места его сознания, великан больше не мог позволить себе игнорировать возможные различия в скорости распространения двух нервных импульсов и разницу в расстоянии между двумя точками на его ногах, в которых произошли внешние события. Единственная причина, по которой в сознании широких масс сохраняется смутное интуитивное понимание одновременности внешних событий, какими бы отдаленными они ни были, заключается в том, что когда события происходят рядом с нами, их одновременное восприятие оправдывает нашу веру в их одновременное происхождение. Затем мы бессознательно экстраполируем эти результаты с места на место и попадаем в ошибочное убеждение, что обладаем таким же интуитивным пониманием одновременности внешних событий во всем пространстве.

Значение предыдущих открытий можно резюмировать следующим образом: при рассмотрении одновременности или последовательности событий мы должны четко различать события, которые сводятся к нашему восприятию чувственных впечатлений, и события, которые относятся к внешним явлениям. Наше признание одновременности или последовательности чувственных впечатлений или мыслей, мелькающих в нашем уме, является фундаментальным в том смысле, что его нельзя подвергнуть дальнейшему анализу. По этой причине физическая теория не может дать физическое определение суждений, которые она признает *априорными*. В отличие от временного положения чувственных впечатлений, мы должны учитывать одновременность или последовательность внешних событий. В этом случае прямое признание нас подводит. Все, что мы можем сделать, это отметить моменты, в которые мы осознали эти внешние события, а затем, обратившись к физическим распространениям, вывести из них моменты, в которые события произошли во внешнем мире. Чтобы избежать путаницы, мы будем называть одновременность внешних событий во всем пространстве *физической одновременностью*, оставляя название *психологическая одновременность* для нашего осознания одновременности двух сенсорных впечатлений.

Все выводы, к которым мы пришли до этого момента, не имеют никакого отношения к собственно теории Эйнштейна. Они воплощают открытия классической науки и, хотя они по-прежнему остаются в силе в теории относительности, мы увидим, что вклад Эйнштейна в проблему одновременности лежит в совершенно другом направлении. Если эти моменты поняты, мы можем перейти к конкретному примеру и исследовать, как физик будет действовать, когда он захочет определить, являются ли два внешних события, происходящих в разных местах, одновременными в физическом смысле.

Предположим, что две мгновенные вспышки света происходят в двух точках, *A* и *B*, на дороге; и что мы хотим выяснить, были ли эти две вспышки произведены одновременно (всегда в физическом смысле). Сам по себе факт того, что мы можем воспринимать две вспышки одновременно или последовательно, не позволяет нам решить этот вопрос, поскольку порядок наших восприятий будет зависеть от нашего положения (конечно,

только в очень небольшой степени в случае зрительных восприятий). Но предположим теперь, что мы стоим в середине C между A и B , измеренной с помощью наших жестких стержней. Если мы воспринимаем две вспышки одновременно (в психологическом смысле), можем ли мы с уверенностью утверждать, что две вспышки произошли одновременно в физическом смысле? Классическая наука ответила «нет», поскольку мы не были уверены, что волна света распространялась от B до C с той же скоростью, что и волна, распространявшаяся в противоположном направлении от A до C . Классическая наука предполагала, что неизвестная скорость дрейфа эфира, вызванная абсолютной скоростью Земли, помешала бы нам сделать определенные выводы, поэтому ничего определенного сказать было невозможно.

Но вся ситуация меняется, как только мы принимаем принцип относительности Эйнштейна и его постулат об инвариантной скорости света. Тогда мы можем утверждать, что дрейф эфира, существует он или нет, не может иметь физического значения; и что поэтому мы вправе предполагать, что лучи света распространяются с одинаковой скоростью во всех направлениях. Если это так, то мы вправе сделать вывод, что одновременность наших восприятий двух вспышек света (в психологическом смысле) гарантирует одновременность (в физическом смысле) двух внешних событий, а именно двух вспышек на дороге.

Теперь, в конкретном примере, который мы рассмотрели, наблюдатель мог расположиться в середине между двумя точками A и B . Но могут возникнуть ситуации, когда такая процедура будет невозможна. Предположим, например, что мы хотим установить, являются ли одновременными два события, происходящие одно на Солнце, а другое на Земле рядом с нами. Как нам поступить?

Мы отметим на наших часах точные моменты, в которые мы воспринимаем оба события. Затем мы примем во внимание время, необходимое для того, чтобы световое сообщение о солнечном событии достигло нас; мы вычтем это время из момента, в который было замечено солнечное событие, и таким образом получим момент, в который событие фактически произошло на Солнце. Если этот момент времени совпадает с психологическим моментом, в который было замечено земное событие рядом с нами, мы будем утверждать, что оба события произошли одновременно. И теперь заметим, что, вычитая время, которое потребовалось свету, чтобы достичь нас от солнечного события, и отмечая таким образом определенный момент, мы фактически восстанавливаем ситуацию, которая сложилась бы, если бы новость о солнечном событии была передана нам через нашу систему отсчета мгновенно с бесконечной скоростью, так что мы можем представить наше определение одновременности следующим концептуальным образом:

Мы скажем, что если возмущение (например, телепатическое) распространяется с бесконечной скоростью от поверхности Солнца, совпадая по времени с солнечным событием и неся новость о нем, и если это возмущение достигает нас на Земле в тот самый психологический момент, когда земное событие воспринимается нами, то эти два события будут одновременными. Аналогично, всегда рассматривая гипотетический случай мгновенной передачи, если солнечное возмущение достигает нас до или после нашего восприятия земного события, происходящего рядом с нами, мы сделаем вывод, что солнечное событие предшествовало или последовало за земным событием. Конечно, это определение с помощью распространения, движущегося через нашу систему с бесконечной скоростью, является чисто концептуальным, поскольку физикам не известно ни одного такого типа распространения; но поскольку оно приведет к точно такому же определению

одновременности, мы можем временно сохранить его, так как это облегчит наше понимание природы открытий Эйнштейна.

Теперь, согласно классической науке, после того как одновременность была определена таким концептуальным образом, любой другой наблюдатель, независимо от его движения, согласился бы с тем, что возмущение прошло от Солнца до Земли с бесконечной скоростью, *т. е.* за нулевое время; так что во всех случаях два события можно было бы считать одновременными в абсолютном смысле. Под этим мы подразумеваем, что они были бы одновременными не только с локальной точки зрения наблюдателя на Земле, но и для всех наблюдателей. Другими словами, физическая одновременность была бы абсолютной; аналогичным образом, промежуток физического времени, разделяющий две последовательные пары одновременных событий, происходящих в разных областях пространства, был бы абсолютным; другими словами, само физическое время было бы абсолютным. Таково было убеждение классической науки.

Но если теперь мы рассмотрим ту же проблему в свете теории Эйнштейна и вспомним, что бесконечная скорость является относительной величиной, зависящей от системы отсчета или относительного движения наблюдателя, то мы обнаружим, что эти мнения больше не являются обоснованными. Как и раньше, наблюдатель на Земле будет совершенно прав, полагая, что два события (солнечное и происходящее рядом с ним) являются одновременными; но, с другой стороны, другой наблюдатель, находящийся в относительном движении, обнаружит, что наблюдатель на Земле ошибается, поскольку, по отношению к его собственной системе отсчета, возмущение не преодолело бы расстояние между Солнцем и Землей за нулевое время с бесконечной скоростью. Поэтому, по его мнению, два события не будут физически одновременными.

Короче говоря, *физическая одновременность и продолжительность, которые классическая наука считала абсолютными величинами, теперь должны рассматриваться как относительные величины, не имеющие абсолютного, универсального значения*, поскольку они изменяются при вычислении в системах отсчета, движущихся с различными относительными скоростями.

Но очень важно понимать, что эта относительность одновременности действует только для событий, происходящих в разных местах, и не распространяется на события, происходящие в одном и том же месте. Причина этого различия легко понятна. Предположим, что два мгновенных события происходят в одной и той же точке и в одно и то же время в нашей системе отсчета. Эти события, будучи одновременными и совпадающими по точке в нашей системе отсчета, считаются **совпадением событий**. Если теперь мы изменим нашу систему отсчета, будут ли эти два события, относящиеся к новой системе отсчета, также одновременными и совпадающими по точке? Очевидно, да. Сам принцип достаточного основания должен удовлетворить нас в этом отношении, поскольку какое бы нарушение одновременности или совпадения ни вызвала смена системы отсчета, поскольку нет ничего, что отличало бы одно событие от другого, ни по положению, ни по времени, нет никакой причины, по которой одно событие должно предшествовать другому, а не следовать за ним, ни по положению, ни по времени, когда система отсчета изменяется. Конкретным примером может служить столкновение двух автомобилей. Здесь мы имеем два тела, расположенных в одной и той же точке дороги (или примерно в одной и той же точке) в один и тот же момент времени; следовательно, наблюдатель на дороге является свидетелем совпадения событий в системе отсчета дороги. Очевидно, что если бы он наблюдал эти события из проходящего поезда, столкновение произошло бы точно так же;

следовательно, с точки зрения системы отсчета поезда, эти два события по-прежнему составляли бы совпадение. Из этого мы видим, что, в отличие от одновременности событий, происходящих в разных местах, которая по сути является относительной и зависит от выбора нашей системы отсчета, совпадение событий является абсолютным, то есть остается совпадением или одновременностью во всех системах отсчета.

Можно заметить, что в мире, где совпадения были бы относительными, то есть в мире, где с дороги было бы видно, что две машины сталкиваются и все пассажиры гибнут, а с поезда такого столкновения не было бы видно, наука была бы совершенно невозможна, поскольку мнения различных наблюдателей были бы относительными до такой степени, что становились бы противоречивыми. В изменчивом мире относительности что-то должно быть абсолютным, и одно из этих абсолютных явлений заключается в совпадениях событий.

Мы можем противопоставить учения классической науки и теории относительности следующим образом: так же как классическая наука признавала, что нет физического смысла говорить об одной и той же точке пространства в разное время, пока, выбрав систему отсчета, мы не объективировали, так сказать, пространство, о котором мы говорили, так и теперь теория относительности заставляет нас добавить: «Нет смысла говорить об одном и том же моменте времени в разных местах, пока мы не объективировали время, так сказать, путем определения нашей системы отсчета». Однако в обеих науках, классической и релятивистской, совпадение событий остается абсолютным, выходящим за рамки выбора системы отсчета. С философской точки зрения, это открытие относительности одновременности имеет такое же важное значение, как и открытие коперниканской системы в астрономии.⁽¹⁵⁵⁾

Установив относительную природу физической одновременности, мы легко обнаруживаем другое следствие этой теории, а именно сокращение длины. Рассмотрим, например, наблюдателя, находящегося в покое на рельсах и наблюдающего за поездом, также находящимся в покое. Какова длина поезда по отношению к системе отсчета наблюдателя, а именно к Земле? Очевидно, что это разница между его расстоянием до локомотива и до последнего вагона. Но если теперь мы рассмотрим более общий случай, когда поезд или наблюдатель с его системой отсчета находятся в относительном движении (любой из этих вариантов приводит к одному и тому же результату, если движения являются галилеевыми), становится необходимым указать, что измерения должны производиться *в один и тот же момент времени*. Было бы абсурдно измерять наше расстояние до заднего вагона в час, а затем наше расстояние до локомотива в два часа, потому что мы могли бы обнаружить, что поезд имеет длину более шестидесяти миль из-за его смещения за этот промежуток времени. Но в то время как в классической науке значение одного и того же времени в двух разных местах было абсолютным, одинаковым для всех наблюдателей, в теории относительности оно становится неопределенным. В зависимости от относительного движения наблюдателя будут получены разные определения одновременности, и в результате длина одного и того же поезда будет варьироваться по значению. Это и есть относительность длины. Расчеты показывают, что чем больше относительная скорость, тем короче будет длина поезда.

Короче говоря, классическая наука признавала, что, помимо нашего интуитивного понимания последовательности или одновременности восприятия двух сенсорных впечатлений, таких как, например, два впечатления боли (*т. е.* одновременность типа «здесь и сейчас»), последовательность или одновременность событий можно определить только

косвенно с помощью физических средств. И даже в этом случае всегда оставалась определенная неопределенность из-за нашего незнания скорости дрейфа эфира. Однако, предполагая, что распределение одновременных событий было определено любым данным наблюдателем, считалось, что эти же события останутся одновременными для любого другого наблюдателя. Другими словами, время и одновременность были абсолютными.

Теория Эйнштейна заставляет нас пересмотреть классические взгляды. Она по-прежнему позволяет нам сохранять веру в абсолютную природу совпадения событий, то есть событий, которые являются копунктуальными и происходят одновременно в любой данной системе отсчета. Но она отрицает абсолютность одновременности пространственно разделенных событий. Таким образом, если два наблюдателя проходят мимо друг друга, события, которые являются одновременными друг с другом и с этим прохождением по мнению одного из наблюдателей, будут признаны как разворачивающиеся последовательно для другого наблюдателя. Отсюда следует, что одновременность событий или одинаковость времени во всем пространстве становится неопределенным понятием до тех пор, пока не будет указан наблюдатель или система отсчета; точно так же вес данного кирпича, расположенного в любой точке пространства, будет неопределенным до тех пор, пока не будет определено распределение окружающих масс. Что касается специальной теории, это единственное различие между классической наукой и теорией относительности.

Можно сказать, что в общей теории, где большие массы материи находятся в относительном движении, все понятие одновременности внешних событий становится неясным, поскольку определение пространства и времени на обширных участках становится невозможным. Таким образом, в общей теории относительности полностью отходит от классической науки. И здесь мы можем упомянуть ряд критических замечаний, направленных против выбора Эйнштейном оптических сигналов для определения одновременности.

Так, доктор Уайтхед пишет: «Само значение одновременности зависит от световых сигналов. Есть слепые люди и темные облачные ночи, и ни слепые люди, ни люди в темноте не испытывают недостатка в чувстве одновременности. Они прекрасно знают, что значит одновременно ударить обеими голеними».^[56]

В этой иллюстрации доктор Уайтхед, несколько свободно ссылаясь на чувство одновременности, путает два вида одновременности, которые физики считают необходимым рассматривать отдельно. Напомним, что эти два вида были проиллюстрированы одновременностью в нашем осознании двух впечатлений (психологическая одновременность) и одновременностью в возникновении двух внешних событий (физическая одновременность). Конечно, в примере, выбранном Уайтхедом, все рассматриваемые события, а именно наше осознание двух болей и фактическое соприкосновение наших голени с перилами, настолько близки друг к другу как в пространстве, так и во времени, что с практической точки зрения путаница вполне оправдана. Тем не менее, поскольку путанный и неясный пример может привести к путанным выводам, необходимо с самого начала прояснить этот вопрос и уточнить, какой тип одновременности мы предлагаем обсудить.

Для начала давайте предположим, что речь идет о психологическом типе одновременности. Тогда критика будет сводиться к следующему: Эйнштейн попытался сделать наше непосредственное осознание одновременности двух сенсорных впечатлений зависимым от результатов оптических измерений, выполненных *апостериорно*. Другими словами, если мы спросим нашего друга, ощутил ли он два звука одновременно или

последовательно, он ответит: «Я не могу ответить, пока не посмотрю правила Эйнштейна для определения одновременности и не проведу определенные оптические измерения». Из этого следовало бы, что если бы не было доступных лучей света или если бы наш друг был слепым, он никогда не смог бы дать нам ответ. Таким образом, Эйнштейн сделал бы наше непосредственное распознавание одновременности или последовательности ощущений зависимым от случайного обстоятельства, а именно от того, что мы наделены зрением. Похоже, что это и есть утверждение доктора Уайтхеда, как следует из его упоминания о «слепых людях» в его критике.

Вряд ли необходимо указывать, что ни Эйнштейн, ни какой-либо другой ученый никогда не пытались отстаивать столь парадоксальное утверждение. Совсем наоборот. Как классическая, так и релятивистская наука полностью согласны с тем, что наша способность распознавать одновременность двух впечатлений (будь то зрительных, тактильных или слуховых) носит характер фундаментального распознавания, которое не поддается дальнейшему анализу. Мы *знаем*, что чувствуем две боли в один и тот же момент, или что две мысли проносятся в нашем уме одновременно, и это все, что можно сказать по этому поводу. Любое обсуждение того, *почему* мы знаем или *как* мы знаем, не касается физика. Это проблема, которую следует оставить специалисту по мозгу или психологу. Что касается физика, то это представляет собой форму *априорного* знания, о котором бесполезно спорить. Поэтому ни в коем случае нельзя утверждать, что теория относительности претендует на интерпретацию этого психологического вида одновременности с точки зрения оптических измерений или, в данном случае, физических измерений любого рода.

Но есть и другой способ взглянуть на эту проблему. Мы могли бы утверждать, что, хотя Эйнштейн никогда не стремился сделать психологическую одновременность зависимой от результатов оптических измерений, с другой стороны, его теория не учитывает этот фундаментальный вид одновременности.

Но любой, кто хоть немного знаком с физикой, с первого взгляда заметит ошибочность этого утверждения. Он поймет, что физика была бы совершенно невозможна, если бы мы игнорировали данные, предоставленные нам нашими фундаментальными познаниями. Рассмотрим, например, то, как Эйнштейн определяет одновременность внешних событий, *например*, двух вспышек, происходящих на набережной. Он говорит нам, что эта одновременность будет реализована, если наблюдатель, стоящий в середине между двумя вспышками, *одновременно осознает два световых впечатления*. Очевидно, чтобы это определение имело какой-либо смысл, необходимо, чтобы мы приписали наблюдателю способность распознавать одновременность этих двух световых впечатлений. Если бы этот факт был проигнорирован или опровергнут теорией, Эйнштейн никогда бы не предложил свое определение.

Подводя итог, можно сказать, что в теории относительности, как и в классической науке, сложные правила, заданные для определения одновременности внешних событий, предполагают, что мы обладаем врожденной способностью различать одновременность и последовательность сенсорных впечатлений. Эти фундаментальные признания затем служат основой для будущих открытий, а сложные правила используются лишь для того, чтобы позволить нам перейти от признания одновременности, которая является *априорной*, к той, которая не может быть определена *априорно*. Что касается самих правил, то те, которые предлагает теория относительности, являются лишь усовершенствованием правил, принятых в классической науке. Помимо этого чисто количественного различия, никаких изменений в методе не происходит.

Поэтому очевидно, что критика доктора Уайтхеда, если ее интерпретировать как относящуюся к психологической одновременности, кажется совершенно необоснованной. Давайте посмотрим, будет ли она более обоснованной, если интерпретировать ее как относящуюся к одновременности внешних событий. В этом случае критика будет иметь следующее значение: наше признание одновременности внешних событий является фундаментальным. Мы знаем, что два события, одно на Солнце, а другое на Земле, являются одновременными, когда мы воспринимаем их одновременно. Физические измерения не имеют отношения к этой проблеме. Теория Эйнштейна не признает этот факт.

Теперь нет никаких сомнений в том, что теория относительности действительно не признает тип одновременности, представленный в этой последней интерпретации критики доктора Уайтхеда. Следовательно, человек, который может иметь такое понимание, будет совершенно оправдан в своем несогласии с теорией, которая характеризует его концепцию одновременности как совершенно необоснованную. Но, по сути, так же поступила бы и классическая наука. Обе науки отказываются согласиться с тем, что мы обладаем какими-либо *априорными* средствами определения одновременности внешних событий. Обе науки утверждают, что во всех таких случаях мы вынуждены прибегать к тем или иным физическим измерениям. Другими словами, обе науки отказываются принимать ту странную доктрину, известную как «неореализм», которая состоит в смешении события, которое происходит, с событием, которое мы ощущаем.

Согласно неореализму, отстаиваемому Уайтхедом и рядом других философов, зрение является вопросом непосредственного восприятия^[57]. Таким образом, события будут одновременны с моментами их восприятия. В том же духе неореалист говорит о событиях, происходящих за зеркалом, или о пространстве, которое он видит за зеркалом, или о сближении рельсов на набережной. В терминологии не проводится различие между статусом таких перспектив и статусом физических объектов, существующих в объективном мире науки. В древности Эзоп предупреждал своих соотечественников об опасностях неореализма, когда сочинил басню о собаке, принявшей кость за свое отражение в воде. Действительно, для простого человека, кажется, нет никакой разницы между отношением неореалиста и отношением неискушенного младенца или примитивного дикаря, который впервые видит зеркало.

Чтобы выбраться из парадоксов, в которые он попадает, неореалист в конце концов вынужден согласиться с тем, что объекты за зеркалом и т. д. не совсем то же самое, что физические объекты. Поэтому он называет их *сенса* или *объектами чувств*. Когда его просят обосновать свою веру в эти таинственные, призрачные сущности, он отвечает, что сенса и объекты чувств, безусловно, существуют, иначе как можно было бы увидеть круглую монету в виде эллипса? Очевидно (так он утверждает), что в дополнение к круглому физическому объекту должно существовать «эллиптическое сенсум», и именно его мы ощущаем.

Едва ли нужно говорить, что ни один ученый не мог бы согласиться с такими неточными аргументами и принять как обоснованную эту произвольную материализацию качеств. Формы и цветовые ощущения — это все, что мы осознаем визуально. Только путем умозаключения, в результате координации ощущений, мы в конечном итоге приходим к вере в существование круглой монеты в объективном мире. После того как мы достигли этой стадии познания, легко объяснить эллиптическое впечатление, которое мы получаем от монеты, поскольку можно доказать, что изображение этой формы сформировалось на сетчатке. Достаточно применить законы геометрической оптики и иметь небольшие знания

о строении глаза, и «сенса» и «объекты чувств» неореалистов можно отбросить как совершенно бесполезные гипотезы.

Более подробное исследование, которое мы не будем навязывать читателю, убедило бы нас в том, что неореализм, если его понимать буквально, основан на смешении умозаключений и непосредственных признаний и приводит к противоречиям, когда делается попытка представить себе объективный мир, выходящий за пределы наших личных взглядов. С другой стороны, если воспринимать его с долей скептицизма, смягчая, когда это необходимо, такими смягчающими выражениями, как «псевдо», «своеобразный» или «не совсем такой же, как», он превращается в простую игру слов, в присвоение одного и того же названия вещам, которые даже неореалист признал бы существенно разными.

Необходимо помнить, что физическая наука имеет дело с общим объективным миром. Этот мир не воспринимается напрямую, а является результатом долгого, трудоемкого и постоянно расширяющегося синтеза личных взглядов. В первую очередь, все, что мы осознаем, — это комплекс ощущений. Поэтому даже примитивные знания дикарей являются результатом весьма сложного синтеза. Но наука должна продолжать синтез, используя результаты предыдущих синтезов в качестве элементов более сложных. Итак, то, что раньше было синтетическим взглядом, становится частным, когда мы поднимаемся на более высокий уровень. Таким образом, если мы рассматриваем вид поверхности Земли с любой точки, наш частный взгляд подсказывает нам, что Земля плоская. Только синтез ряда частных взглядов и опытов может привести нас к утверждению, что Земля круглая; и наука, соответственно, говорит о круглости нашей планеты и игнорирует ее плоскость. Говоря более техническим языком, поиск объективного мира схож с поиском инвариантов или инвариантных уравнений группы преобразований. В этой иллюстрации каждое преобразование соответствует переходу от одной частной перспективы к другой, тогда как инварианты соответствуют сущностям объективного мира, с которыми имеет дело наука. Открытие пространственно-временной вселенной, которое будет обсуждаться в следующей главе, иллюстрирует эту процедуру.

Безусловно, во многих случаях частная точка зрения может быть более интересной, чем коллективная. Так будет в случае, если художник захочет нарисовать пейзаж на своем холсте. Он, конечно, нарисует удаленные объекты в меньшем масштабе и сблизит рельсы. Но, в отличие от художника, ученый не особенно заинтересован в частной точке зрения, за исключением того, что она является средством для достижения цели. Его конечной целью является общий объективный мир.

Единственное обвинение, которое можно выдвинуть против научного подхода (который в данном случае совпадает с подходом обычного человека), заключается в том, что этот объективный мир сводится к ряду умозаключений, является лишь ментальной конструкцией и, следовательно, не может обладать той же степенью реальности, что и впечатления, которые мы испытываем непосредственно. Большинство ученых согласились бы с справедливостью этого обвинения, если под «тем, что мы испытываем непосредственно» мы подразумеваем наше осознание ощущений. Но они решительно противостояли бы утверждениям неореалистов, которые стремятся расширить значение этих слов, чтобы охватить существование своих ощущений и объектов ощущений; эти же представляют собой не что иное, как выводы, которые они сделали из своего осознания ощущений. И именно в эту ошибку впадает неореалист, когда, увидев красную вспышку в небе, он говорит о звезде, «сейчас» взорвавшейся в небе. Если он хочет избежать выводов, он должен ограничиться словами: «Я испытываю «здесь и сейчас» светящееся впечатление

на темном фоне». Насколько он знает, светящееся впечатление может быть вызвано огнем самолета, светлячком или чисто субъективной галлюцинацией.

В любом случае, мы хотим подчеркнуть, что, хотя верно сказать, что объективный мир является синтезом частных взглядов или восприятий, мы не должны забывать добавлять, что частные взгляды сами по себе являются продуктом синтеза ощущений. Но поскольку наука должна иметь дело с общим, а не только с частным, и поскольку именно общий объективный мир делает возможным это общее знание, именно этот мир ученый будет отождествлять с миром реальности. Отныне частные взгляды, хотя и столь же реальные, будут рассматриваться как его перспективы. Поэтому мы должны признать, что общий объективный мир, существует ли он на самом деле или является лишь удобной фикцией, незаменим для науки, хотя бы в качестве рабочей гипотезы. И неореализм, как мы уже сказали, *при последовательном применении* делает коллективное видение невозможным. Кроме того, с точки зрения науки, будь то классическая физика, теория относительности, физиология или психология, неореализм несостоятелен, поскольку ни при каких обстоятельствах зрение и наше знание о природе в целом не могут считаться предметом непосредственного восприятия. Точно так же мы знаем, что 7 умноженное на 8 равно 56, и получаем этот результат сразу, без размышлений и без необходимости считать на пальцах. Если бы неореалист не вспомнил о трудностях, с которыми он столкнулся при изучении таблицы умножения, он, вероятно, сказал бы нам, что наше знание свойств чисел также является вопросом непосредственного восприятия. С точки зрения науки, между предполагаемой непосредственностью восприятия и нашим знанием результата умножения 7 на 8 очень мало различий. Ни одна из этих двух форм знания не может рассматриваться в свете непосредственного восприятия. В любом случае, независимо от нашего отношения к неореализму, в научных дискуссиях мы должны четко определять значение наших слов и перестать применять одно и то же слово «одновременность» к одновременности в научном смысле, как к объективному миру, и к одновременности в неореалистическом смысле, как к непосредственно воспринимаемой. Примечательно, что доктор Уайтхед, который придумал такое множество новых слов, когда в этом едва ли была необходимость, упустил эту прекрасную возможность, когда она оказалась крайне важной.^[158]

Однако мы не намерены далее обсуждать неореализм, поскольку эта доктрина не представляет интереса для науки. Мы хотим лишь отметить, что в любой научной теории, будь то теория Ньютона, Максвелла или Эйнштейна, мы с самого начала можем быть уверены, что автор будет иметь дело с объективным миром науки, рассматривая личные взгляды как простые точки зрения, и будет формулировать свои концепции и определения соответственно. Поэтому, если доктор Уайтхед желает защищать доктрину, которая противоречит взглядам всех ученых от Ньютона до Эйнштейна, было бы более понятно (), если бы он ограничил свои нападки классической наукой. Ведь когда мы критикуем новую теорию, такую как теория Эйнштейна, которая внесла столько революционных идей в наше понимание природы, следует предположить, что причины нашего несогласия проистекают из этих идей, а не из классических, которые теория оставила нетронутыми. Таким образом, если бы было доказано, что материя является непрерывной, а не атомарной, мы не должны были бы винить теорию Эйнштейна в нашей прежней вере в атомарность материи. Скорее мы бы подвергли сомнению эксперименты и теории тех классических физиков, которые считали, что доказали атомарность. С другой стороны, если бы мы возражали против мнения, что одновременность внешних событий относительна по отношению к движению наблюдателя, утверждая, что она абсолютна, то, конечно, мы были бы правы, критикуя саму

теорию Эйнштейна, поскольку относительность одновременности является ее особенностью.

Безусловно, доктор Уайтхед, по-видимому, находится под впечатлением, что он просто атакует новые революционные идеи, введенные Эйнштейном. Таким образом, он говорит нам, что он просто защищает «старомодное убеждение в фундаментальном характере одновременности», но можно задаться вопросом, к какому периоду человеческой мысли он относится. Классическая наука около трехсот лет назад признала ошибочность этого смешения внешних событий и моментов, в которые они воспринимаются, именно потому, что было обнаружено, что такая позиция приводит к результатам, полностью противоречащим опыту.

Как выражается Вейль, ссылаясь на открытие Рёмера в 1675 году: «Открытие того, что свет распространяется с конечной скоростью, нанесло смертельный удар естественному представлению о том, что вещи существуют одновременно с их восприятием». Разумеется, то, что применимо к световым передачам, в равной степени применимо к распространению нервного возбуждения по телу и ко всем другим видам передач.

Общие выводы, к которым мы пришли в результате обсуждения одновременности в разных местах, без особых изменений применимы к ряду других концепций, которые мы смутно ощущаем и наполовину понимаем. Рассмотрим, например, случай температуры. Почему ученый прибегает к термометрам, а не доверяет непосредственным ощущениям своих органов чувств? Просто потому, что термометр дает объективное определение равенства двух температур и может различать различия, которые наши чувства не в состоянии уловить. В результате, когда термометр показывает разницу в температуре в несколько сотен градусов по Цельсию — скажем, -200° и $+400^{\circ}$ — ученый утверждает, что такая разница существует, хотя для наших чувств в обоих случаях ощущение будет одинаковым — обжигающим. Но, каким бы неточным и ненадежным ни было наше непосредственное восприятие температуры, наше непосредственное распознавание одновременности пространственно разделенных событий еще более расплывчато. Ведь в то время как люди без особого труда могут согласиться с тем, что одна комната теплее другой, даже без помощи термометра, они выскажут самые противоречивые мнения, когда их спросят, какой из двух взрывов произошел первым. Их ответы, если они не будут основаны на результатах физических измерений, будут варьироваться в зависимости от их относительного положения.

Теперь, поскольку ученый измеряет температуру термометром, никто не обвинит его в том, что он хочет сказать, что понятие температуры перестанет существовать, если его термометр упадет на землю и разобьется. Почему же тогда тот факт, что мы определяем одновременность в разных местах с помощью световых сигналов, должен означать, что мы делаем понятие одновременности зависимым от поведения света и что одновременность не может иметь значения для слепых людей?

Единственная цель всех этих измерений — уточнить и прояснить понятия, которые мы понимаем лишь смутно и неопределенно. В большинстве случаев эти понятия возникли из грубого опыта. Однако есть случаи, когда они возникли более сложным образом. Предположим, например, что наши тела не чувствительны к теплу или холоду. Поведение наших термометров все равно будет предполагать абстрактное понятие, которое мы могли бы назвать «температура». Фактически, даже если бы у нас не было термометров, понятие температуры в конечном итоге было бы введено в физику по теоретическим причинам. «Энтропия» дает нам иллюстрацию понятия, введенного таким образом. Наши чувства не

могут ее обнаружить, и наши приборы не регистрируют ее напрямую. Тем не менее, она навязала себя науке. Разница в энтропии может быть измерена косвенно, так же как можно измерить температуру, продолжительность и пространство, но всегда с помощью физических средств; и это действительно единственный способ, которым мы можем улучшить наше понимание этих понятий и договориться о том, о чем мы говорим. Кстати, мы можем вспомнить, что именно с помощью физических измерений Эйнштейн смог продемонстрировать относительность одновременности, о которой наше так называемое прямое восприятие природы даже не заставляло нас подозревать. Следовательно, принять относительность одновременности, которая вытекает из высокосложных физических измерений, а затем придерживаться теории прямого восприятия природы, — это путь, который любому логически мыслящему человеку должен показаться верхом несообразности.

Теперь мы должны рассмотреть вторую критическую замечание, также высказанное доктором Уайтхедом. В нем он, по-видимому, временно отказался от доктрины непосредственного восприятия, признав (предположительно для целей аргументации), что определение одновременности в пространственно разделенных точках может потребовать введения физических распространений, но он возражает против исключительного обращения Эйнштейна к оптическим передачам для этой цели. Таким образом, он говорит нам:

«Существуют и другие физические сообщения от места к месту: передача материальных тел, передача звука, передача волн и ряби на поверхности воды, передача нервного возбуждения по телу и бесчисленные другие формы, которые входят в привычный опыт. Передача света — лишь одна из многих».

Поскольку эти аргументы выдвигаются в духе критики, мы должны предположить, что, по мнению доктора Уайтхеда, если бы были рассмотрены другие виды передачи, кроме оптической, то были бы сделаны выводы, отличные от выводов Эйнштейна.^[59] Но утверждение такого рода было бы в корне неверным. Выводы Эйнштейна дали бы точно такие же результаты, если бы вместо оптической передачи была использована звуковая; и единственная причина, по которой постоянно упоминается оптическая передача, заключается в том, что она позволяет проводить более точные наблюдения. Теперь мы рассмотрим причины этих утверждений.

Проблема определения времени может быть разделена на две части: во-первых, мы хотим определить равные последовательные промежутки времени в одной и той же точке пространства, например, в точке, где мы находимся. Во-вторых, мы хотим согласовать наши расчеты времени с расчетами других наблюдателей, находящихся в разных точках пространства.

Поскольку мы уже рассмотрели проблему временной конгруэнтности в одной точке, мы не будем на ней чрезмерно задерживаться. Достаточно вспомнить, что наше непосредственное восприятие временной конгруэнтности слишком расплывчато и неопределенно, чтобы быть полезным в научных исследованиях. Соответственно, на протяжении всей истории мы видим, как люди полагаются на те или иные физические процессы: горение свечей, песочные часы, механические часы, вращение Земли, колебания атомов и т. д. Ньютон дал теоретическое определение временной конгруэнтности, когда сформулировал закон инерции, согласно которому абсолютно свободное тело проходит равные расстояния за равное время. Согласно этому определению, измеряя равные расстояния по пути тела, мы могли отмечать последовательные равные промежутки

времени. Но на практике было удобнее использовать хронометры, регулируемые в конечном счете вращением Земли. Теперь мы можем перейти к проблеме синхронизации в классической науке.

Предположим, что у нас есть несколько хронометров, которые, когда их ставят рядом, отбивают часы, минуты и секунды в совершенном унисоне, а значит, идут с одинаковой скоростью. Предположим теперь, что, начертив круг, скажем, радиусом в десять миль, мы держим один хронометр в центре, а остальные хронометры переносим в различные точки, распределенные по окружности круга. Если кто-то решит подшутить и сдвинет стрелки хронометров, расположенных по окружности, мы столкнемся с проблемой восстановления синхронизма. Классическая наука предлагала различные методы для достижения этого результата.

Во-первых, мы могли бы поочередно переносить наш центральный хронометр к каждому из хронометров, расположенных по окружности, и таким образом восстановить синхронизм. Но этот метод вызывал возражения, поскольку перемещая хронометр туда и обратно, мы могли бы каким-то образом нарушить его работу.

Второй метод заключался в использовании вращения Земли вокруг своей оси. Присвоив полному обороту нашей планеты значение 24 часа, мы могли разделить ее поверхность на равноудаленные меридианы, а затем утверждать, что прохождение одной и той же звезды от одного меридиана к другому всегда занимает одинаковое время. Предположим, для примера, что поверхность Земли была разделена на 24 полумеридиана, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Тогда, если звезда прошла определенный меридиан в точке *A* в определенное время *t*, она пройдет соседний меридиан *B* через час. Чтобы синхронизировать два часа, расположенные на этих двух меридианах *A* и *B*, необходимо было бы просто установить первый часы *A* на «ноль» часов, когда звезда прошла свой меридиан *A*, а затем установить второй часы *B* на «один» час, когда звезда прошла второй меридиан *B*. Часы были бы тогда синхронизированы, так что событие, происходящее по первым часам, когда их стрелки показывали время *t*, было бы одновременным с событием, происходящим по вторым часам, когда их стрелки также показывали *t*. Но этот метод снова вызывал определенные возражения, которые нет необходимости повторять, поскольку мы уже обсуждали их в предыдущей главе. Они касаются замедляющего влияния приливов и отливов и «дыхания» Земли. Конечно, эти возражения носят придирчивый характер, но они все равно теоретически обоснованы, поскольку не сводятся к простым ошибкам наблюдения.

Третий метод синхронизации, рассматриваемый классической наукой, был получен путем обращения к распространению, которое служило бы для установления связи между пространственно разнесенными часами. В этой роли предлагалось использовать распространение звуковых волн. Согласно этому методу, мы должны были действовать следующим образом: в полдень, как отмечалось на нашем хронометре в центре, мы должны были произвести выстрел из пушки. Все наблюдатели, стоящие у своих часов по окружности, должны были бы, услышав выстрел, настроить свои часы на час «полдень плюс время, необходимое звуку для прохождения от центра до окружности». Учитывая скорость звука в воздухе и расстояние от центра до окружности, этот промежуток времени можно было бы вычислить, а часы синхронизировать. Но и в этом случае мы должны были бы убедиться, что не дует ветер; кроме того, даже в случае неподвижной атмосферы мы должны были бы предположить, что скорость звука постоянна и остается одинаковой во всех направлениях, т. е. что его распространение изотропно. Мы знали, что в первом

приближении это так, но ни один высокоточный эксперимент никогда не подтверждал этот факт.

Наконец, звуковые волны можно было заменить световыми или радиосигналами. Этот метод наиболее широко использовался в классической науке; он позволял добиться большей точности, чем звуковые сигналы, и имел более широкое применение, чем определения, основанные на вращении Земли. Например, когда астроном хотел определить текущее положение кометы, единственным возможным методом был оптический. Соответственно, он был вынужден учитывать время, необходимое для того, чтобы свет кометы достиг его. Другими словами, одновременность определялась оптическими сигналами. Подобным образом, Эйфелева башня в Париже каждый день в полдень посылает радиосообщение, и корабли в море могут соответственно регулировать свои часы. (Разумеется, все это не имеет никакого отношения к теории Эйнштейна.) Тем не менее, признавая, что определение одновременности с помощью оптических сигналов было наиболее точным методом, классическая наука имела определенные сомнения относительно его теоретической точности. Предполагалось, что эффект дрейфа эфира, вызванный движением Земли, приводит к анизотропии в распространении света, подобно тому, как ветер влияет на звук, заставляя его распространяться быстрее в одном направлении, чем в другом. Поскольку скорость этого дрейфа эфира была неизвестна, не было возможности внести необходимые поправки.

Теперь, в результате отрицательных экспериментов в области электромагнетизма, Эйнштейн призывает нас признать, что эти сомнения классической науки были необоснованными. Существует ли он вообще или является мифом, дрейф эфира не оказывает никакого влияния на распространение света. Пространство галилеевой системы отсчета является изотропным в том, что касается распространения света; то есть свет распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях. Эти результаты были установлены с помощью самых точных экспериментов, известных науке, и есть все основания принимать их, по крайней мере до тех пор, пока их достоверность не будет опровергнута более точными экспериментами. В этих условиях оптический метод определения одновременности, который уже использовался до появления теории относительности, становится, с учетом открытия Эйнштейна, самым совершенным методом, доступным науке.

Из этого довольно длинного обсуждения мы видим, что в определении одновременности теория Эйнштейна не предлагает никакого принципиально нового метода. В любой науке измерение времени и определение одновременности в разных местах могут быть достигнуты только путем обращения к тем или иным физическим процессам. Если мы хотим отказаться от физических определений и дать абстрактное определение, понятие одновременности в разных местах сводится к простому словесному выражению. Следующий отрывок из лекций Эйнштейна в Принстоне может прояснить этот вопрос:

«Теория относительности часто подвергается критике за то, что она без обоснования отводит центральную теоретическую роль распространению света, поскольку основывает понятие времени на законе распространения света. Однако ситуация выглядит примерно следующим образом: чтобы придать физическое значение понятию времени, необходимы процессы, которые позволяют установить отношения *между разными местами*. Не имеет значения, какие процессы выбираются для такого определения времени.^[60]

«Однако для теории выгодно выбирать только те процессы, о которых мы знаем что-то определенное. Это в большей степени относится к распространению света в *вакууме*, чем к любому другому процессу, который можно было бы рассмотреть, благодаря исследованиям Максвелла и Х. А. Лоренца.

«Исходя из всех этих соображений, данные о пространстве и времени имеют физически реальное, а не чисто фиктивное значение».

Вернёмся к критике Уайтхеда. Надо признать, что с точки зрения эксперимента и наблюдения оптические измерения дают большую точность, чем все другие методы наблюдения, основанные на распространении звука и т. д. Они не только легче наблюдать, но и в меньшей степени зависят от изменений окружающих условий (*например*, скорости ветра). Теперь, как мы уже отмечали ранее, когда критик атакует теорию относительности на том основании, что она определяет одновременность с помощью оптических методов, следует предположить, что он приписывает странность теории Эйнштейна исключительно использованию световых сигналов. Если бы это мнение было верным, то, безусловно, было бы довольно произвольным основывать теорию Вселенной на одном конкретном выборе определения времени, когда другие методы дали бы нам классические результаты. Почему, действительно, определять время с помощью света, а не звука или движущихся тел? Но, как упоминалось в других местах, это мнение *неверно*, поскольку независимо от типа распространения, к которому мы прибегаем, в идеальных условиях наблюдения будут получены точно такие же определения одновременности. Каждый экспериментальный тест, который подтвердил предсказания теории, косвенно доказывает это последнее утверждение.

Чтобы прояснить этот фундаментальный момент, рассмотрим следующий конкретный пример: предположим, что мы стоим в середине между двумя пушками. Согласно оптическому критерию Эйнштейна, обе пушки были бы выстрелены одновременно, если бы мы восприняли две вспышки в один и тот же момент времени. Классическая наука не согласилась бы с этой точкой зрения на том основании, что дрейф эфира в незначительной степени исказил бы наши результаты; но даже классическая наука признала бы, что если бы физический эффект дрейфа эфира был доказан как несуществующий, то в определении Эйнштейна не было бы ничего, с чем можно было бы не согласиться. Если же, следуя Эйнштейну, мы предположим, что отрицательные эксперименты доказали несущественность дрейфа эфира, то и классическая наука, и теория относительности признают, что одновременность восприятия двух вспышек повлекла бы за собой одновременность восприятия двух звуков (при условии, что не дует ветер). Кроме того, обе пули пролетели бы мимо нас в один и тот же момент (при условии, что пушки, заряды и пули были идентичны).

Из этого следует, что теория Эйнштейна, поскольку она изначально утверждает, что эффект дрейфа эфира равен нулю, неизбежно приводит к выводу, что независимо от того, как мы решим определить одновременность (с помощью оптического, акустического или пулевого метода), результаты определения одновременности будут точно такими же. Темные, облачные ночи или случайное обстоятельство, что мы наделены зрением, не имеют к этому никакого отношения; слепые люди не будут лишены возможности участвовать в эксперименте, поскольку они всегда могут синхронизировать свои часы с помощью звуковых сигналов.

Таким образом, мы видим, что странность теории Эйнштейна возникает не из-за использования им оптических сигналов, а из-за его фундаментальной предпосылки, что дрейф эфира не может влиять на ход физических явлений. Те, кто желает не согласиться с этой теорией, должны поэтому сосредоточить свое внимание на проблеме дрейфа эфира. Предпочтение Эйнштейна в пользу оптических сигналов является лишь второстепенным вопросом, который вполне можно было бы отбросить в пользу передачи звука, если бы не соображения практической удобства и точности. В этом отношении теория не претерпела бы никаких изменений. Мы установили этот момент в случае одновременности, но, учитывая его важность, мы можем рассмотреть эту проблему в более общем плане.

Как мы уже отмечали, как только признается нерелевантность дрейфа эфира и уравнения электромагнетизма принимаются как точные, мы приходим к тем преобразованиям пространства и времени, которые известны как преобразования Эйнштейна-Лоренца. Когда мы утверждаем, что продолжительность могла бы быть определена с точки зрения движущихся тел или передачи звука (в идеальных условиях наблюдения), наше утверждение равносильно утверждению, что преобразования Лоренца-Эйнштейна, хотя и полученные в результате изучения электромагнитных и оптических явлений, тем не менее имеют универсальное применение ко всем видам явлений. Здесь критик может возразить, что это необоснованное предположение. Возможно, это и так, но мы должны понимать, что если бы его достоверность была оспорена, если бы классические преобразования были верны для механики и акустики, а преобразования Лоренца-Эйнштейна были верны для электромагнитных процессов, мы столкнулись бы с невыносимыми противоречиями. Таким образом, согласно преобразованиям Лоренца-Эйнштейна, примененным к электромагнетизму, луч света, распространяющийся *в вакууме*, будет проходить мимо любых двух разных галилеевых наблюдателей с одинаковой скоростью. Но согласно классическим преобразованиям, примененным к механике, тело, движущееся со скоростью относительно одного наблюдателя, будет двигаться с другой скоростью относительно второго наблюдателя. Если же тело движется вместе с гребнем световой волны по мнению одного наблюдателя, то по мнению второго наблюдателя оно либо опередит волну, либо отстанет от нее. Совпадение для одного больше не будет совпадением для другого. Таким образом, совпадение перестанет быть абсолютным, и сомнительно, сможет ли существовать какая-либо наука, поскольку в природе будет отсутствовать всякое единство. Кроме того, сосуществование двух противоречивых видов преобразований пространства и времени кажется весьма маловероятным, если вспомнить, что невозможно установить четкое различие между механикой и электродинамикой, поскольку материя, по-видимому, в значительной степени является электромагнитным явлением.

Поэтому вполне естественно, что ученые должны предположить, что преобразования Эйнштейна-Лоренца, хотя и выведенные из электромагнитных или оптических процессов, должны действовать во всех областях физической науки, даже внутри атома. Правда, эти преобразования были получены в результате изучения оптических и электромагнитных явлений, а не акустики или механики, но это лишь потому, что эксперименты, столь же чувствительные, как эксперименты Майкельсона и Физо, вряд ли могли бы быть проведены с достаточной точностью, если бы рассматривались звуковые волны, нервные возбуждения или рябь на воде. И все же, если бы эксперимент Физо был проведен со звуковыми волнами, есть все основания полагать, что было бы наблюдаемое любопытное соотношение скоростей.

Представленные до сих пор аргументы показывают, что определения пространства и времени, полученные из электромагнетизма и оптики, по всей вероятности, являются также определяющими для всей физической вселенной. Такова и позиция Эйнштейна, когда он без колебаний применяет релятивистские преобразования ко всем видам явлений. Но именно потому, что в результате этого применения он предвидел явления, не совпадающие с теми, которые были выведены из классических преобразований, и именно потому, что его предсказания были подтверждены высокоточными экспериментами, его предположение об универсальной действительности релятивистских преобразований следует считать оправданным.

Поэтому ни в коем случае мы не можем рассматривать время и одновременность, определяемые оптическими сигналами, как особый вид оптического или электромагнитного времени и одновременности, расходящийся с не менее оправданными определениями, вытекающими из механических процессов или передачи звука.

Короче говоря, если мы хотим просто координировать природные явления, мы должны таким образом представлять себе различные потоки времени и одновременности, определенные Эйнштейном, как время, навязанное нам не капризом математика, не только оптическими передачами, но и всем физическим миром. Таким образом, времена относительности — это те, которые будут управлять всеми физическими процессами, а не только оптическими; и по этой причине мы должны рассматривать их как представляющие реальные потоки времени во вселенной.

Понимание этого момента имеет важное значение. Например, в общей теории мы увидим, что закон гравитации Эйнштейна требует замедления времени вблизи больших масс материи. Если мы примем общее значение этого факта как влияющего на все физические явления, это повлечет за собой замедление скорости колебаний атома, расположенного в гравитационном поле. Это знаменитый *эффект сдвига Эйнштейна*, который с тех пор был подтвержден. Однако до того, как он был обнаружен, и пока он еще считался сомнительным, некоторые мыслители утверждали, что он вполне может оказаться несуществующим на том основании, что атом может не действовать как идеальные часы и не сможет приспособиться к местной скорости течения времени. Однако Эйнштейн отказался принять этот выход и заявил, что если эффект не будет подтвержден, то вся теория должна быть отвергнута, поскольку времена относительности должны иметь универсальное значение или же быть бесполезными.

В заключение можно сказать, что кажется неоправданным утверждать, что определения времени и одновременности Эйнштейна зависят от поведения света. Они зависят от процессов природы, поведение света является лишь частным примером которых. Поэтому мы должны исправить критику относительности доктора Уайтхеда, согласно которой само значение одновременности зависит от световых сигналов, заменив слова «световые сигналы» словами «физические процессы». Но после такой поправки критика теряет всю свою силу. Ведь мы можем говорить о одновременности во всем пространстве, о мгновенном пространстве, сколько угодно, но пока мы не узнаем достаточно об этих ускользающих понятиях, чтобы иметь возможность отличать одновременные события от неодновременных, мы не можем утверждать, что имеем какое-либо определенное представление о том, о чем говорим. В этом отношении классическая наука и теория относительности полностью согласны.

ГЛАВА XVI

ПРАКТИЧЕСКОЕ СООТВЕТСТВИЕ В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В предыдущей главе мы упомянули некоторые из наиболее важных аспектов проблемы физического пространства. Мы видели, что понятие пространственного равенства или конгруэнтности, как считалось, возникло из фактов опыта. Некоторые объекты, казалось, сохраняли один и тот же визуальный облик, где бы они ни находились, при условии, что мы соответствующим образом изменяли наше собственное положение как наблюдателей. Но такие фундаментальные признания были слишком расплывчатыми, чтобы быть полезными для науки; поэтому конгруэнтными телами были определены те, которые при постоянной температуре и давлении совпадали, когда их помещали рядом.

Конгруэнтность, согласно этому определению, предполагала физические измерения материальных тел; и, как заметил Пуанкаре, все, что мы могли бы обнаружить таким образом, сводилось бы к законам конфигурации твердых тел, а само пространство выходило бы за пределы наших экспериментов, поскольку тела могли бы вести себя так или иначе в одном и том же пространстве. Позиция Пуанкаре приводит нас к полному агностицизму в том, что касается геометрии пространства. Если нам отказано в физических измерениях, то нет никаких средств для решения проблемы пространства, поскольку у нас нет *априорных* средств для определения того, что структура пространства такова или иная. Логические аргументы бесполезны, поскольку они не приводят нас к какому-либо определенному решению, а лишь к множеству возможностей. Таким образом, мы возвращаемся к основному утверждению Пуанкаре, а именно: «пространство аморфно». В нем мы можем определять конгруэнтность любым удобным для нас способом (теоретическая конгруэнтность), хотя из соображений практической целесообразности необходимо руководствоваться свойствами так называемых твердых тел. Таким образом, мы получаем физическое определение практической конгруэнтности, которое позволяет нам определить геометрию, которую для всех практических целей следует называть геометрией реального физического пространства.

Когда мы рассматриваем аргументы Пуанкаре, против них можно сказать очень мало. Тем не менее, физик должен сосредоточить свое внимание на пространстве, с которым он может справиться, на том, которое можно исследовать физическими методами. Эта позиция, отстаиваемая Эйнштейном (которая была также позицией Гаусса и Римана), приводит нас к пространству, геометрия которого определяется путями лучей света, законами природы, выраженными в их простейшей форме, и снова численными результатами измерений, полученными с помощью материальных стержней, поддерживаемых в постоянных условиях давления и температуры. Именно этим пространством мы и будем заниматься.

Но прежде чем продолжить, давайте четко обозначим, что, согласно современным представлениям, задача наших стержней состоит в том, чтобы раскрыть уже существующую структуру пространства, подобно тому, как термометр раскрывает уже существующие различия температуры в доме. Поэтому ни в коем случае нельзя утверждать, что стержни создают пространство, так же как термометр создает температуру, а барометр создает погоду. Путья позволяют нам исследовать пространство, потому что они

приспосабливаются или приспосабливаются к его структуре, или метрическому полю. Происхождение этой структуры до сих пор остается загадкой. По мнению Римана, она была создана материей, но под материей он подразумевал не материю нашего прута, а совокупную материю всей вселенной. Цилиндрическая вселенная Эйнштейна подтверждает взгляды Римана. В любом случае, независимо от загадочной проблемы конечного происхождения метрического поля, независимо от того, существует ли эта структура пространства *сама по себе* как характеристика физического пространства или же она создается массами космоса, в любом случае она предшествует нашему локальному исследованию с помощью стержней, масса которых слишком незначительна, чтобы изменить ее в какой-либо заметной степени.

Также давайте вспомним, что когда мы обсуждаем пространство, мы должны уточнять его, относя его к системе отсчета, в частности к галилеевой системе (в которой не действуют силы инерции). Затем мы приступаем к рассмотрению законов расположения наших конгруэнтных тел в этой системе, и природа полученных геометрических результатов будет определять геометрию пространства. Как мы знаем, евклидова геометрия является результатом (по крайней мере, в первом приближении).

Классическая наука никогда не считала необходимым оговаривать, что наши стержни должны находиться в покое в нашей системе отсчета, но с учетом открытий теории относительности мы видим, что это условие необходимо уточнить. Два стержня, концы которых совпадают в состоянии относительного покоя, перестанут совпадать в состоянии относительного движения, так что квадрат, начерченный на полу нашей системы отсчета, окажется удлинненным прямоугольником, если измерить его стержнем, находящимся в относительном движении. Конечно, подобные результаты были бы ожидаемы даже в классической науке, если бы предполагалось, что движущийся стержень сжимается или деформируется из-за своего движения через эфир. В таком случае измененные показания стержня не имели бы отношения к пространству и его геометрии, так же как и в случае, когда мы изменяем показания стержня путем нагрева или сдавливания. Вина за несоответствие была бы возложена исключительно на возмущающие условия, воздействующие на стержень.

Согласно теории Лоренца, такая интерпретация была бы возможна, поскольку сокращение Фитцджеральда можно было бы объяснить давлением, создаваемым движением стержня через неподвижный эфир. Но согласно теории относительности такая интерпретация больше не может быть оправдана. Ведь когда между *A* и *B* существует относительная скорость (*a не относительное ускорение*), нет смысла спрашивать, что находится в движении: *A* или *B*. Это, по сути, и составляет суть специального принципа относительности. Следовательно, когда мы рассматриваем движущийся стержень, мы не можем придавать его движению абсолютного значения. Любое движение, существующее между системой отсчета и стержнем, с одинаковой степенью обоснованности можно отнести к движению системы отсчета, скользящей под неподвижным стержнем, поскольку нет абсолютного термина сравнения, такого как неподвижный эфир Лоренца, который мог бы решить этот вопрос. И поэтому мы не можем утверждать, что так называемый движущийся стержень претерпел физическое изменение в результате своего движения, изменение, делающее его непригодным для измерений.

И все же, если мы сохраняем все наши стержни в равной степени действительными, будь то в движении или в покое, мы получаем противоречивые результаты, которые лишают геометрию пространства всякого значения. Когда мы анализируем эту аномальную

ситуацию, мы обнаруживаем, что следующие факты явно выделяются: стержни остаются неизменными, будь то в движении или в покое, и все же их длина меняется. Правда заключается в том, что длина не является определенной характеристикой тела; она появляется как тень чего-то другого, проецируемого в пространство нашей системы отсчета. Когда стержень находится в покое в нашей системе отсчета, его длина, или тень, достигает максимума; это как будто что-то и его тень совпадают. Но при относительном движении это что-то наклоняется — наклоняется вдоль четвертого измерения вне пространства нашей системы отсчета; и его тень сокращается пропорционально. Однако этот стержень, который движется в нашей системе отсчета, находится в покое в какой-то другой системе отсчета, и в этой другой системе отсчета это что-то снова совпадает со своей тенью. Итак, мы должны предположить, что различные галилеевы системы отсчета и пространства, которые они определяют, по-разному наклонены, повернуты в четвертом измерении относительно друг друга.

Таким образом, больше не существует единого всеобъемлющего евклидова пространства, которое можно было бы определить по отношению к той или иной галилеевой системе отсчета. Вместо этого мы должны представить себе неопределенное множество евклидовых пространств, по-разному наклоненных, но слитых воедино.^[61] Каждой отдельной галилеевой системе отсчета будет соответствовать одно из этих пространств, так что, когда мы меняем наше движение, мы также меняем наше пространство.

Ситуация аналогична той, которая возникает, когда мы рассматриваем различные вертикали, проведенные к поверхности Земли.

Джон в Лондоне будет утверждать, что его вертикаль действительно вертикальна, а вертикаль Питера в Нью-Йорке наклонена, и Питер ответит ему тем же. Из-за этих расхождений мы не можем считать, что эти две вертикали определяют одно и то же направление, хотя обе они могут быть действительно вертикальными для Джона и Питера соответственно. Скорее мы должны сказать, что существует неопределенное количество различных вертикальных направлений, ни одно из которых не является более вертикальным в абсолютном смысле, чем любое другое. Теперь замените понятие вертикали понятием трехмерного пространства, и мы получим картину пространств относительности.

Очень похожие выводы применимы к времени. Рассмотрим двух наблюдателей **A** и **B** в их соответствующих движущихся системах отсчета. Каждый наблюдатель держит в руке часы, и эти часы, когда они находятся в покое относительно друг друга, показывают одно и то же время; они определяют совпадающие отрезки времени. Классическая идея практического совпадения времени, основанная на приблизительных наблюдениях, привела нас к выводу, что эти условия будут сохраняться независимо от положения часов в пространстве и независимо от их относительных движений.

Но теперь оказывается, что промежутки времени, определяемые тиканьем часов, находящихся в покое в системе отсчета **A**, будут казаться наблюдателю **B**, находящемуся в относительном движении, более длинными, чем они кажутся наблюдателю **A**. Результат является довольно общим и применим ко всем процессам. Таким образом, продолжительность вращения волчка будет иметь разные значения в зависимости от относительного движения наблюдателя. Аргументы, аналогичные тем, которые мы изложили в случае пространства, показывают, что время больше не является единственным. Должно сосуществовать множество различных направлений времени, по-разному

наклоненных, каждое из которых относится к какой-то конкретной системе отсчета, а значит, к какому-то конкретному наблюдателю. В результате одновременность двух событий, происходящих в разных точках пространства, больше не может быть абсолютной, поскольку одновременность зависит в основном от выбранного нами времени, а значит, от нашей системы отсчета.

Так же как каждая система отсчета имела свое собственное пространство, так и теперь она будет иметь свое собственное время и свое собственное определение одновременности. Мы можем обобщить эти различные открытия, заявив, что не может существовать универсального определения практической конгруэнтности ни для пространства, ни для времени; следовательно, не может существовать геометрии для универсального пространства или для универсального времени.

Философским следствием этих новых точек зрения является лишение универсального пространства и времени объективного значения, которое им ранее приписывалось. Отныне, по словам Минковского, «пространство и время сами по себе опускаются до положения простых теней».

Рассмотрим, например, мерную линейку. Если эту же линейку измеряют различные наблюдатели, проходящие мимо нее с разными скоростями, она будет иметь разную длину. Пространство, занимаемое этой линейкой, не может быть наделено какой-либо определенной величиной, поскольку эта величина зависит как от точки зрения наблюдателя, так и от характеристик линейки. Это и есть относительность расстояния. Не следует путать это открытие Эйнштейна с фундаментальной относительностью всех расстояний в концептуальном пространстве. Хотя классическая наука признавала, что в концептуальном пространстве не существует такого понятия, как абсолютное расстояние, она полагала, что в реальном пространстве физика расстояние между двумя данными точками в системе отсчета может быть однозначно определено для всех наблюдателей с помощью жестких линеек. Именно это последнее мнение было опровергнуто открытиями Эйнштейна.

То же самое относится и к продолжительности, если мы помним, что продолжительность любого явления будет иметь разные значения в зависимости от относительного движения наблюдателя; и именно этот факт выражается утверждением, что время или продолжительность являются относительными.

Таким образом, ни пространство, ни время сами по себе не могут существовать в реальном феноменальном мире, который исследует физик. Пространство и время представляются лишь способами восприятия, простыми отношениями, варьирующимися и изменяющимися в зависимости от условий относительного движения, существующего между наблюдателем и наблюдаемым. С исчезновением объективности пространства и времени, рассматриваемых как абсолютные и универсальные формы нашего восприятия, объективность всего физического мира, казалось, погрузилась в туман. Если же нужно было сохранить какую-либо объективность, то необходимо было осуществить синтез всех индивидуальных точек зрения всех различных наблюдателей, чтобы сформировать в одно единственное представление множественность индивидуальных пространств и множественность индивидуальных продолжительностей.

Если бы этот результат был достигнут, относительность практической конгруэнтности как для пространства, так и для времени уступила бы место некоему универсальному определению практической конгруэнтности, справедливому для всех наблюдателей

независимо от их относительного движения и подразумевающему, следовательно, существование некоего абсолютного континуума, который больше не является простой тенью. Вместо индивидуальной точки зрения, меняющейся в зависимости от относительного движения наблюдателей, мы должны были бы получить безличное и, следовательно, общее объективное понимание природы.

Достижение этой высшей синтеза точек зрения всех наблюдателей было осуществлено Минковским в 1908 году. Ему удалось получить инвариантное определение конгруэнтности, объединив определения практической конгруэнтности для пространства и времени, данные любым наблюдателем, и показав, что эта комбинация обладает инвариантным значением, одинаковым для всех других наблюдателей. Конечно, полученный тип конгруэнтности не был ни пространственным, ни временным. Это было сочетание обоих. Но его существование показало нам, что, превосходя пространство и время, существовало безличное и фундаментальное четырехмерное метрическое континуум, которое Минковский назвал пространством-временем. Полученное им определение конгруэнтности для этого загадочного континуума доказало, что оно является евклидовым (точнее, полувеклидовым).

Неуловимость пространства и времени, или, скорее, неоднозначность этих понятий, зависящих от наблюдателя, который их измеряет и ощущает, заменяется общей объективностью этого фундаментального континуума, который одинаков для всех и превосходит конкретные условия движения наблюдателя. Это континуум, хотя само по себе не является ни пространством, ни временем, тем не менее относится к обоим, поскольку наблюдатель может разделить его на то конкретное пространство и то конкретное время, которые характерны для системы отсчета, в которой он находится, и которые составляют пространство и время, в которых он живет и проводит эксперименты.

Отныне реальное расширение мира имеет четырехкратный порядок, и геометрия относительности обязательно является четырехмерной. То, что мы называем пространством нашей галилеевой системы отсчета в данный момент, является лишь поперечным сечением этого четырехмерного пространственно-временного мира; а то, что мы называем временем нашей системы отсчета, лежит по перпендикуляру к этому сечению. Переходя от одной галилеевой системы отсчета к другой, мы меняем наше пространство и меняем наше время. Наше новое мгновенное пространство, хотя и остается трехмерным поперечным сечением четырехмерного пространственно-временного мира, наклонено по отношению к нашему прежнему поперечному сечению; и тот же наклон происходит для перпендикулярного направления, называемого временем. Фактически, эта ситуация представляет собой поразительную аналогию с различными направлениями вертикалей к поверхности Земли. Они также проявляют разные направления, потому что различные двумерные части поверхности Земли по-разному наклонены в трехмерном пространстве. Таким образом, большое изменение в нашем понимании пространственно-временного фона, большая разница между пространством-временем и отдельным пространством и временем классической науки заключается в этом процессе наклона, который сопровождает изменение относительного движения.

Чтобы прояснить эти моменты, давайте поймем, что когда мы говорим о мгновенных пространствах двух наблюдателей, находящихся в относительном движении, как о наклоненных друг относительно друга, а значит, лежащих вне друг друга (за исключением их общего двумерного поперечного сечения), мы не имеем в виду, что пространство одного из них является какой-то непонятной сущностью с точки зрения другого. Наклонные мгновенные пространства будут входить в наше восприятие, но не как пространства сами по

себе: они будут представляться как последовательность двумерных поверхностей, движущихся с постоянной скоростью.

Все эти пространства одинаково оправданы. Ни одно из них не выделяется более явно, чем другое, на основании симметрии по отношению к четырехмерному миру. Только когда мы уточняем систему отсчета наблюдателя, будет выделено одно конкретное пространство и одна конкретная продолжительность. Следовательно, мы можем сказать, что практическая конгруэнтность существует для пространства и времени, как в классической науке, при условии, что галилеева наблюдатель производит свои измерения с помощью стержней и периодических механизмов, таких как часы, которые не перемещаются в его галилеевой системе отсчета во время проведения измерений. Таким образом, утверждение о том, что расстояния между двумя парами точек, находящимися в покое в системе отсчета, являются конгруэнтными или неравными, имеет совершенно определенное физическое значение; но мы должны уточнить, что это расстояние измеряется в соответствии со стандартами системы отсчета; то же самое относится и к промежуткам времени. Точно так же, как и в классической науке, галилеев наблюдатель обнаружит при измерении с помощью своих конгруэнтных стержней, что его пространство является евклидовым. Только когда стержни и часы находятся в относительном движении или когда, находясь в покое в нашей системе отсчета, система отсчета случайно ускоряется или подвергается гравитационному воздействию, они перестают измерять конгруэнтные промежутки. Следовательно, только когда мы рассуждаем безлично, не указывая никакой конкретной системы отсчета, только когда мы рассуждаем с точки зрения всех возможных наблюдателей, каким бы ни было их движение, пространство и время исчезают в тени; и только тогда мы вынуждены, нравится нам это или нет, рассуждать в терминах общего объективного мира относительности, то есть в терминах четырехмерного пространства-времени.

ГЛАВА XVII

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРЕДПОСЫЛОК ЭЙНШТЕЙНА

Рассмотрим галилееву систему и две точки A и B в этой системе. Если луч света распространяется от A до B , то постулат об инвариантной скорости света требует, чтобы расстояние AB , измеренное нами в системе отсчета, деленное на время, необходимое (согласно времени нашей системы отсчета) для прохождения световой волны этого расстояния, всегда было равно c , скорости света. Если бы мы наблюдали то же явление из какой-либо другой галилеевой системы, точки A и B первой системы в моменты прохождения луча света соответствовали бы некоторым другим точкам A' и B' нашей второй системы. Но, как и в первом случае, мы могли бы измерить скорость света между двумя точками A' и B' нашей второй системы. Принцип неизменной скорости света гласит, что в любой галилеевой системе, в которой мы могли бы работать, измеренная скорость света в вакууме всегда была бы одинаковой.

Конечно, эта скорость может быть положительной или отрицательной, в зависимости от того, направлен ли луч света вправо или влево; но мы можем устранить эту неоднозначность знака, рассматривая квадратные значения.

Математическое выражение этого принципа физики дает нам следующее уравнение, значение которого должно оставаться неизменно равным нулю для всех галилеевых систем

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = 0 \text{ (using differentials)}$$

отсчета:

Когда мы переходим от одной галилеевой системы отсчета к другой, dx, dy, dz, dt могут изменяться по значению; но эти изменения должны быть связаны таким образом, чтобы сумма вышеуказанного математического выражения оставалась неизменно равной нулю. Таково математическое условие, выражающее принцип неизменной скорости света.

Теперь наша задача состоит в том, чтобы точно определить, насколько должны изменяться значения различных величин dx, dy, dz, dt при переходе от одной галилеевой системы отсчета к другой, движущейся с постоянной скоростью v по отношению к первой, чтобы ранее записанное математическое условие инвариантности оставалось выполненным. С чисто математической точки зрения, задачи такого типа относятся к области математики, известной как теория инвариантов. Такие проблемы изучались много лет назад, и было известно, что отношения между переменными dx, dy, dz, dt , или, что то же самое, преобразования, которым необходимо было подвергнуть эти переменные (чтобы удовлетворить условию инвариантности, изложенному выше), задавались широкой группой преобразований, известных как *конформные преобразования*.⁽¹⁶²⁾

Но когда, кроме того, принимается во внимание относительность скорости, становится видно, что *конформные преобразования* являются слишком общими. Мы должны их

ограничить; и когда налагаются необходимые ограничения, мы обнаруживаем, что правила преобразования, согласно которым пространственные и временные координаты одного галилеева наблюдателя связаны с координатами другого, зависят очень простым образом от относительной скорости, существующей между двумя системами. Эти правила преобразования задаются **преобразованиями Эйнштейна-Лоренца**.^[63]

Как мы уже сказали, эти преобразования более ограничены, чем конформные преобразования; и эта меньшая общность преобразований Эйнштейна-Лоренца имеет, как следствие, дальнейшее ограничение условий инвариантности упомянутого ранее математического выражения. Это выражение не только будет иметь нулевое значение для всех галилеевых систем отсчета, когда оно имеет нулевое значение для одной конкретной галилеевой системы отсчета, но и, кроме того, если оно не имеет нулевого значения в одной системе отсчета, но имеет некоторое определенное ненулевое числовое значение, оно все равно будет сохранять это же определенное ненулевое значение во всех других галилеевых системах отсчета. Другими словами, предпосылки Эйнштейна математически представлены инвариантностью общего значения $x^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$ для всех галилеевых систем отсчета, независимо от того, является ли это значение нулевым или ненулевым.

Глубокое значение этого условия инвариантности впервые было отмечено Минковским, и это привело, как мы объясним в следующей главе, к открытию четырехмерного пространства-времени.

ГЛАВА XVIII ОТКРЫТИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

$$x^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

Открытие этой инвариантной величины

, значение которого мы обозначим как ds^2 , знаменует собой дату огромной важности в истории естественной философии. Дело в том, что с открытиями Эйнштейна такие привычные абсолюты, как длины, продолжительности и одновременности, оказались изменчивыми и варьирующимися по величине, когда мы переходили от одной галилеевой системы к другой, то есть когда мы изменяли постоянную величину относительной скорости, существующей между нами как наблюдателями и наблюдаемыми событиями. С другой стороны, наконец-то появилась неизменная величина ds^2 , представляющая собой квадрат пространственного расстояния, пройденного телом в любой галилеевой системе отсчета, минус c^2 , умноженное на квадрат продолжительности, необходимой для этого движения (продолжительность, конечно, измеряется по стандарту времени той же системы отсчета). Не имело значения, находились ли мы в этой системе отсчета или в той; в любом случае, если ds^2 имела определенное значение при отнесении к одной системе отсчета, она сохраняла то же значение при отнесении к любой другой системе отсчета.

Очевидно, мы имели дело с чем-то, что, в отличие от расстояния в пространстве или продолжительности во времени, выходило за пределы индивидуальных особенностей наших переменных точек зрения. Это было первое предчувствие, которое мы испытали в

теории Эйнштейна о существовании общего абсолютного мира, лежащего в основе относительности физического пространства и времени.

Минковский сразу же распознал в математической форме этой инвариантности выражение квадрата расстояния в четырехмерном континууме. Это расстояние было названо **интервалом Эйнштейна** или, проще говоря, **интервалом**. Неизменность всех таких расстояний подразумевала абсолютный характер метрических отношений этого четырехмерного континуума, независимо от нашего движения, и тем самым подразумевала абсолютную природу самого континуума. Континуум не был ни пространством, ни временем, но относился к обоим, поскольку расстояние между двумя его точками можно было разделить на пространственные и временные расстояния различными способами, так же как расстояние в обычном пространстве можно разделить на длину, ширину и высоту, также различными способами. По этим причинам его называли **пространством-временем**, и интервал стал синонимом расстояния между двумя точками в пространстве-времени.

И здесь необходимо отметить некоторые аспекты этой проблемы. Во-первых, может показаться странным, что измерения с помощью часов могут быть скоординированы с измерениями с помощью линеек или весов. Однако эта трудность не должна нас останавливать, поскольку, хотя dt — это время, которое можно измерить только с помощью часов, cdt , являясь произведением скорости на время, представляет собой пространственную длину, поскольку оно обозначает пространственное расстояние, пройденное светом за время dt . По этой причине мы можем считать, что наше четырехмерное континуум обладает свойствами экстензивного пространства.

Наша следующая задача — определить природу геометрии этого загадочного континуума. Сам факт, что удалось записать выражение этого квадрата интервала с квадратными величинами, такими как dx^2 , dy^2 и т. д., без использования таких терминов, как $dx dy$, $dx dt$ и т. д., сам по себе подразумевает, что континуум был плоским и не содержал никаких следов неевклидовости или кривизны. Кроме того, это подразумевает, что система сеток, к которой мы относим это расстояние, является системой прямых линий, а не криволинейных (см. главу VII).

Единственное плоское континуум, которое мы изучали до сих пор, является евклидовым, но в данном случае мы видим, что, хотя наше континуум и является плоским, оно не является строго евклидовым из-за знака минус, предшествующего cdt ; или, опять же, из-за того, что $g_{44} = -1$, а не $g_{44} = +1$, как в четырехмерном евклидовом пространстве. Тем не менее, из-за постоянства значений g_{ik} по всей системе сеток, а значит, из-за плоскости или отсутствия неевклидовости или кривизны континуума, аналогия с евклидовым континуумом очень велика, и по этой причине он называется полуевклидовым. ⁽¹⁶⁴⁾

Поэтому мы говорим, что пространство-время является четырехмерным полуевклидовым континуумом и отличается от истинного евклидова четырехмерного континуума только тем, что имеет одно мнимое измерение и три положительных вместо четырех положительных. В этом континууме время представляет собой так называемое мнимое измерение, а три измерения пространства представляют собой три положительных измерения; однако следует помнить, что все, что мы хотим сказать этим утверждением, — это то, что существует разница между измерениями пространства и времени. Мы могли бы с таким же правом назвать время положительным измерением, а три измерения пространства — мнимыми измерениями.

Теперь мы также увидели, что математическая форма выражения, дающего квадрат расстояния, зависит не только от геометрии континуума, но и от системы координат, которую мы можем принять. В данном случае форма математического выражения говорит нам, что наши системы координат или системы сеток обязательно являются декартовыми, то есть состоят из систем сеток четырехмерных кубов. Таким образом, мы видим, что все наши различные галилеевы системы сеток, если рассматривать их как системы отсчета, соответствуют по-разному ориентированным декартовым системам сеток в четырехмерном пространстве-времени.^[65]

Короче говоря, пространство-время следует рассматривать как фундаментальное континуум Вселенной. Само по себе оно не является ни пространством, ни временем. Любой галилеев наблюдатель разделяет его на четыре направления с помощью своей конкретной декартовой сетки; одно из этих направлений соответствует его измерениям времени, а три других — его измерениям пространства.

Отныне мгновенное событие, происходящее в определенной точке нашей галилеевой системы и в определенный момент нашего времени, будет представлено одной определенной точкой в пространстве-времени, точкой в четырехмерном пространстве-времени, называемой **точечным событием**. Само пространство-время тогда предстает как континуум точечных событий, точно так же, как обычное пространство считалось континуумом точек, а время — континуумом мгновений. Конечно, точечные события, как и точки и моменты времени, являются лишь абстракциями; ведь точка без протяженности и момент времени без продолжительности — это математические вымыслы, введенные для определенности; они являются лишь абстракциями из опыта.

Так же как мгновенное событие представлено точечным событием, так и продолжительное событие, такое как тело, имеющее продолжительное существование и занимающее поэтому одну и ту же точку или последовательные точки в пространстве нашей системы координат в последовательных моментах времени, будет представлено непрерывной линией, называемой **мировой линией**. Если эта линия прямая, тело находится в покое в нашей галилеевой системе или же движется с постоянной скоростью по прямой линии. Если мировая линия изогнута, движение тела ускоряется или становится непрямолинейным в нашей галилеевой системе координат; следовательно, оно ускоряется или становится криволинейным в пространстве (благодаря абсолютному характеру ускорения). Таким образом, все явления, сводящиеся к движениям частиц, представляются абсолютными рисунками в пространстве-времени.

В соответствии с галилеевой системой отсчета, которую мы можем принять, мы разделяем пространство-время на пространство и время тем или иным образом. Следовательно, разложение изображений явлений на пространственные и временные компоненты осуществляется различными способами. Таким образом, мы получаем вариации в пространственно-временных проявлениях явлений. Несмотря на эти вариации, зависящие от нашего относительного движения, сами абсолютные пространственно-временные изображения с их пересечениями остаются неизменными, и прямое изучение абсолютного мира будет состоять в изучении этих абсолютных изображений без ссылки на их меняющиеся пространственно-временные проявления.

Следует отметить, что, поскольку пространство-время представляется абсолютным континуумом, существующим независимо от наших измерений, нет никаких причин ограничивать себя декартовыми сетками, когда мы хотим его исследовать. Как мы знаем, система координат является лишь математическим приспособлением, облегчающим наши

исследования; и с чисто математической точки зрения мы всегда можем с одинаковой степенью обоснованности разделить данное континуум с помощью той или иной системы координат. Однако следует помнить, что в случае пространства-времени, когда мы хотим выразить результаты наших измерений в терминах пространства и времени, присущих нашей системе отсчета, система координат, которую мы должны принять, уже не является произвольной.

Как мы видели, все галилеевы наблюдатели должны разбивать пространство-время с помощью своих особых декартовых сеток. Некоторые криволинейные сетки будут с большей или меньшей точностью соответствовать разбиению пространства-времени ускоренными или вращающимися наблюдателями. Но в наиболее общем случае произвольные криволинейные сетки не соответствуют разбиению пространства и времени ни одного из возможных наблюдателей, хотя этот факт не умаляет их полезности.

Что касается существенных характеристик самого пространства-времени, эти гауссовы системы координат являются столь же легитимными, как и декартовы. Фактически, когда пространство-время становится искривленным из-за наличия гравитации, декартовы координаты не могут быть реализованы, поскольку они несовместимы с кривизной континуума.

Однако, независимо от используемой системы координат, некоторые общие характеристики наших пространственно-временных чертежей остаются абсолютными. Так, мы видели, что интервал между двумя точками пространства-времени имеет значение, которое не зависит от изменения системы координат. Хотя верно, что мировая линия, которая измеряется как прямая в декартовой системе, может казаться искривленной, если относиться к ней как к криволинейной или гауссовой, с другой стороны, пересечения или непересечения мировых линий являются абсолютными и никоим образом не зависят от нашего выбора системы координат. Именно по этой причине такие явления, как совпадения, являются абсолютными, в отличие от одновременности событий в пространственно разделенных точках. Они являются относительными.

Таким образом, если два бильярдных шара соприкасаются при наблюдении одного человека, они будут продолжать соприкасаться при наблюдении всех других людей, независимо от относительного движения этих людей. Соприкосновение шаров представляет собой совпадение, пересечение мировых линий двух шаров; следовательно, оно является абсолютным. С другой стороны, если два бильярдных шара одновременно ударяются о разные борта в наблюдении одного человека, то в наблюдении человека, движущегося относительно первого, они, как правило, не будут ударяться о борта одновременно. Причина заключается в том, что наш второй наблюдатель применит новую систему координат, ориентированную иначе, чем первая; и в этой новой системе координат два пространственно-временных точечных события, представленные мгновенными ударами двух шаров о две борта, больше не будут обязательно лежать на одном и том же расстоянии вдоль нового направления времени.

В связи с широким использованием криволинейных систем координат в общей теории, мы должны помнить, что в криволинейной системе координат квадрат интервала

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + 2g_{13}dx_1dx_3 + \dots$$

принимает более сложную форму

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k.$$

, что более лаконично выражается формулой

g_{ik} больше не являются константами, как в случае, когда мы имели $g_{11} = g_{22} = g_{33} = +1$ и $g_{44} = -1$, причем все остальные g_{ik} исчезали; теперь они имеют переменные значения от места к месту, а что касается dx_1, dx_2, dx_3, dx_4 , то они больше не обязательно представляют различия в пространстве и времени; они являются просто математическими гауссовыми различиями чисел. Несмотря на все это, числовое значение ds^2 , квадрат интервала, остается неизменным независимо от выбранной системы координат.

Психологическая продолжительность, или старение, также может быть представлена в пространстве-времени. Под психологической продолжительностью мы понимаем течение времени, которое ощущает наблюдатель; или, еще точнее, продолжительность, которая была бы отмечена часами, которые он держит в руке. Психологическая продолжительность измеряется длиной пространственно-временной мировой линии, которой следует наблюдатель. Если мы будем помнить об этом, парадокс путешествующего близнеца, который будет обсуждаться в следующей главе, утратит большую часть своего парадоксального характера.

Мы также можем понять, как открытие пространства-времени позволяет нам объяснить двойственность природы движения: относительную при перемещении и равномерную, абсолютную при ускорении или вращении. Пока мы пытались объяснить эту двойственность, приписывая трехмерному пространству соответствующую структуру, мы сталкивались со странной трудностью: если бы мы предположили, что пространство имеет плоскую структуру, то есть состоит из плоскостей и прямых линий, то можно было бы понять, почему свободное тело, приведенное в движение с какой-либо определенной скоростью, должно двигаться по одной из этих прямых линий или канавок в пространстве. Оно следовало бы по своему естественному курсу, и вокруг него была бы полная симметрия; все протекало бы гладко, и никакие силы не возникали бы. Затем, если бы мы попытались отклонить тело от его прямолинейного курса, заставляя его следовать по кривой, мы бы заставили его нарушить законы структуры пространства, отклонив его от пространственной канавки, по которой оно нормально следовало бы. Не было невозможно предположить, что канавка будет реагировать и возникнут противодействующие силы. Таким образом, тот факт, что криволинейное или вращательное движение сопровождалось силами инерции, а значит, проявлялось как абсолютное, не представлял собой непреодолимой трудности. Но настоящая трудность возникла, когда мы рассмотрели другой вид ускоренного движения, т. е. переменное движение по прямой линии. В этом случае, поскольку траектории тел были прямыми (а значит, согласовывались с плоской структурой пространства), никакого нарушения законов этой пространственной структуры не наблюдалось. И все же силы инерции снова присутствовали. Их появление было трудно интерпретировать с точки зрения пространственной структуры.

Однако, когда мы заменяем отдельное пространство и время четырехмерным пространством-временем, трудность исчезает. Теперь мы замечаем, что все ускоренные движения, независимо от того, являются ли они прямолинейными или криволинейными, представлены кривыми мировыми линиями в пространстве-времени. Таким образом, все

эти ускоренные движения нарушают плоскую структуру пространства-времени, и по этой причине они всегда будут генерировать силы инерции. С другой стороны, когда мы рассматриваем галилеевы, равномерные или поступательные движения, мы видим, что, как и в случае трехмерного пространства, они будут представлены прямыми линиями. Эти движения будут тогда находиться в полной гармонии с плоской структурой пространства-времени, и никакие силы инерции не возникнут.

Таким образом, благодаря пространству-времени объясняется одна из выдающихся трудностей, с которой столкнулась классическая наука, а именно двойственная природа пространства и движения.

ГЛАВА XIX

РАЗЛИЧНЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ МИРЫ

Мы видели, что большое различие между теорией Эйнштейна и классической наукой возникает из значения, которое следует придавать инвариантной скорости мира. В классической науке считалось, что эта скорость бесконечна, и это привело нас к миру, в котором пространство и время разделены. Согласно теории относительности, значение инвариантной скорости конечно и задается константой c , которая входит в уравнения Максвелла; эта константа физически иллюстрируется скоростью света в вакууме.

Однако с чисто математической точки зрения, если мы не будем учитывать отношения реальности, мы можем рассмотреть другие чисто формальные возможности. Предположим, что инвариантная скорость, хотя и конечная, равна некоторому числу C , отличному от постоянной Максвелла c . Очевидно, что C , будучи максимальной скоростью, должна быть больше или равна самой высокой скорости, известной физикам, следовательно, должна быть равна или больше c , скорости света. Поэтому давайте предположим, что C больше, чем c . Как и в теории Эйнштейна, мы по-прежнему будем иметь дело с четырехмерным пространством-временем, но этот мир будет отличаться от мира относительности из-за несоответствия между инвариантной скоростью C и постоянной Максвелла c . Это будет означать, что уравнения электромагнетизма больше не будут сохранять ту же форму при смене галилеевых систем отсчета. В результате, прежние отрицательные эксперименты в электромагнетизме теперь должны давать положительные результаты, и будет обнаружена абсолютная скорость в пространстве. Теория относительности должна быть отвергнута.

Но мы можем рассмотреть еще один случай. Предположим, что инвариантная скорость мира была бы некоторой мнимой величиной iC , где i , как и прежде, обозначает $\sqrt{-1}$, а C — некоторое произвольное конечное число. Поскольку квадрат этой мнимой скорости является отрицательным числом, квадрат ds^2 теперь принял бы форму

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + C^2 dt^2.$$

Таким образом, ds^2 будет задаваться суммой четырех квадратов вместо суммы трех квадратов и разности. Это доказывает, что пространственно-временной континуум является евклидовым, имея четыре измерения одной и той же категории, а не полувеклидовым, как в теории Эйнштейна, с мнимым измерением времени. Время теперь не будет отличаться от пространства. Трудно представить, как такой мир будет проявляться перед нами. Единственная причина, по которой мы упоминаем этот случай, заключается в том, чтобы более ясно показать, что классическое убеждение в отдельности времени и пространства было эквивалентно классическому предположению, что инвариантная скорость была бесконечной, а не конечной величиной, реальной или мнимой.

Один момент, который, по-видимому, ввел в заблуждение многих, касается значения, которое следует придавать четырехмерному пространственно-временному континууму. Во всех случаях, упомянутых в этой главе, было бы допустимо говорить о мире как о четырехмерном континууме событий. Но с разделением пространства и времени в

классической науке это утверждение было искусственным из-за абсолютности времени, которое выделялось само по себе в отличие от пространства; поэтому четырехмерный аспект мира никогда не подчеркивался. С пространством-временем дело обстоит иначе. Теперь этот аспект больше нельзя игнорировать, поскольку становится невозможным отделить пространство от времени каким-либо абсолютным образом, действительным для всех наблюдателей. Таким образом, мы видим, что четырехмерная природа мира является фактом, который был раскрыт теорией относительности. До открытий Эйнштейна любое упоминание пространства и времени как одного континуума было бы неоправданным расширением общепринятого значения слов.

Теперь вернёмся к различным типам миров, которые мы обсуждали в предыдущих параграфах. Можно дать альтернативное представление упомянутых результатов. Таким

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - C^2 dt^2 = \text{invariant},$$

образом, мы начинаем с математического выражения ds^2 :

где C представляет собой инвариантную скорость без каких-либо уточнений относительно ее значения. (Она может быть бесконечной, как в классической науке, или равной постоянной Максвелла, как в теории Эйнштейна, или даже равной некоторому мнимому числу, как в последнем рассмотренном случае). Тогда можно показать, что, разделив это уравнение на dt^2 и приравняв результат к нулю, мы получаем уравнение, которое соответствует отношениям, действующим в трехмерном пространстве. Это уравнение задается формулой

$$V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 = c^2$$

где V — компоненты этой скорости по трем взаимно перпендикулярным направлениям пространства. Когда математическое выражение такого рода дается как инвариантное или абсолютное, теория групп позволяет нам определить природу геометрических правил, согласно которым переменные, входящие в выражение, могут быть сложены вместе. В данном случае эти переменные представляют скорости, так что мы находимся на пути к открытию правил, регулирующих сложение скоростей. Из этого уравнения получаются следующие результаты.

1°. Если C , инвариантная скорость, бесконечна, как в классической науке, то оказывается, что состав скоростей должен быть евклидовым; поэтому мы должны быть в состоянии объединять скорости графически по хорошо известному правилу параллелограмма или евклидова треугольника. В этом случае, конечно, скорости, лежащие в одном направлении, могут быть сложены и вычтены как числа.

2°. Если C , инвариантная скорость, больше не бесконечна, а конечна, и если она является действительным числом, как в теории Эйнштейна, то правила, по которым складываются скорости, оказываются правилами геометрии Лобачевского. Поэтому, если в теории Эйнштейна мы хотим складывать скорости, мы должны оперировать не евклидовым, а лобачевским треугольником. Мы могли бы, например, начертить наши треугольники на поверхности псевдосферы, поскольку геометрия этой поверхности, как мы знаем, является

лобачевской. В этом случае скорости, лежащие в одном направлении, больше не будут складываться как числа в арифметике.

3°. Аналогичным образом мы должны обнаружить, что если инвариантная скорость C , будучи конечной, оказалась бы мнимым числом, то сложение скоростей следовало бы правилам геометрии Римана. В этом случае мы видели, что четырехмерное пространство-время было бы евклидовым, а не полувеклидовым.^[66] Мы упоминаем этот третий тип вселенной лишь из соображений симметрии. Очевидно, что он не соответствует миру, в котором мы живем, поэтому в дальнейшем мы не будем к нему обращаться, ограничиваясь классическим миром и миром относительности.

Когда нам приходится решать, какая из двух альтернатив верна (пространство-время или отдельное пространство и время), какая из них соответствует реальности, *априорные* спекуляции бесполезны, поскольку оба решения возможны и удовлетворяют фактам грубого наблюдения. Наше единственное средство — это обратиться к эксперименту, и под экспериментом мы подразумеваем наблюдения, которые более надежны, чем наши грубые восприятия без помощи сверхточных инструментов. Только благодаря таким экспериментам мы можем успешно установить, требует ли структура мира конечной инвариантной скорости. Если наши эксперименты укажут на существование конечной инвариантной скорости, наша проблема будет решена в пользу мира пространства-времени по сравнению с миром отдельного пространства и времени.

Теперь эксперимент показывает, что распространение света *в вакууме* дает нам конкретный пример этой критической скорости. Отсюда следует, что измерение скорости распространения света даст нам точное числовое значение критической скорости. По этой причине распространение света приобретает огромное теоретическое значение. Разумеется, эта важность света обусловлена исключительно его физическим поведением *в вакууме*, исключительно тем фактом, что он движется с неизменной скоростью, а не тем, что в силу каких-то случайных обстоятельств он оказывается видимым для человеческого глаза. Ведь свет, проходящий через стекло или воду, также виден, но его скорость, будучи уменьшенной, больше не является неизменной. Следовательно, распространение света через вещество больше не может служить для прямого определения неизменной скорости. Кроме того, мы можем отойти от света как видимого явления, рассмотрев вместо него невидимое электромагнитное распространение.

Если мы захотим, мы можем сделать еще лучше и полностью исключить электромагнитные волны. Ведь если принять во внимание отрицательные результаты экспериментов в области электродинамики, мы поймем, что инвариантная скорость — это не что иное, как постоянная c , которая входит в уравнения Максвелла, откуда любой эксперимент, способный измерить c , автоматически даст нам инвариантную скорость. В частности, мы могли бы измерить отношение электрического заряда, вычисленного в электростатических, а затем в электромагнитных единицах; это снова дало бы нам значение постоянной Максвелла c , а значит, и критической инвариантной скорости. Мы также можем обратиться к необходимым следствиям существования критической скорости, например, к своеобразному закону Лобачевского, который он влечет за собой для сложения скоростей. Затем мы должны проверить эти следствия экспериментально, выяснить, оправданы ли они фактами, и сделать из этого вывод о существовании и значении инвариантной скорости.

Эксперимент Физо позволяет провести такую проверку и доказывает, что сложение скоростей является лобачевским, а не евклидовым, и соответствует существованию критической инвариантной скорости 186 000 миль в секунду. Правда, в эксперименте Физо мы снова имеем дело с распространением света, хотя и не *в вакууме*, где его скорость инвариантна, а в воде. Именно потому, что его скорость в воде уменьшается, скорость воды будет влиять на скорость света, что позволит нам проверить релятивистский закон сложения скоростей. Но опять же, причина, по которой распространение света входит в большинство этих испытаний, заключается исключительно в том, что оптические эксперименты позволяют добиться большей точности. Помимо этого, нет необходимости ограничиваться экспериментами, связанными с распространением света, будь то *в вакууме* или через материальные тела, такие как вода. Любая скорость, будь то скорость звука или пули, выпущенной из проезжающего поезда, должна позволить нам обнаружить тот же закон лобачевского сложения и, таким образом, продемонстрировать существование пространства-времени.

В любом случае, один момент должен быть уже ясен. Каким бы методом мы ни руководствовались, мы никогда не сможем обойтись без физических измерений того или иного рода. Поэтому бессмысленно говорить об определении инвариантной критической скорости без ссылки на измерение скорости света *в вакууме* или, более обще, без ссылки на физические измерения, относящиеся к явлениям, которые обязательно повлекло бы за собой существование конечной инвариантной скорости во Вселенной. Из этого следует, что без тех или иных физических измерений мы не имеем возможности установить, является ли мир миром отдельного пространства и времени или миром пространства-времени.

Теоретически даже грубые наблюдения должны были привести нас к решению по этому вопросу, поскольку грубые наблюдения отличаются от наблюдений физиков только в вопросе точности. Таким образом, теоретически до Эйнштейна мы должны были бы знать о неверности евклидова сложения скоростей и, следовательно, знать о пространстве-времени. Причина нашего неудачного попытки сделать это важное открытие легко понятна, если учесть, что из-за очень большой величины инвариантной конечной скорости c правило Эйнштейна практически неотличимо от классического правила, если речь не идет о очень больших скоростях. Из этого видно, что причина, по которой эффекты, предсказанные теорией Эйнштейна, так трудно обнаружить, заключается в очень высоком значении инвариантной скорости c . Если бы эта конечная инвариантная скорость оказалась небольшой, скажем, миля в секунду, классическая концепция мира, состоящего из отдельных пространства и времени, была бы отвергнута много лет назад, поскольку любопытные эффекты, предсказанные Эйнштейном, стали бы заметны без особых усилий. С другой стороны, если бы мы представили себе, что эта инвариантная скорость становится все больше и больше, отличительные черты вселенной Эйнштейна постепенно исчезли бы, пока, наконец, если бы инвариантная скорость стала бесконечной, пространство-время уступило бы место раздельному пространству и времени классической науки, и все особенности вселенной Эйнштейна исчезли бы.

Прямое изучение преобразований Лоренца-Эйнштейна привело бы к тем же выводам, поскольку, если в этих преобразованиях мы сделаем бесконечным, то обнаружим, что они вырождаются в классические галилеевы преобразования. И здесь необходимо отметить довольно тонкий момент. Константа c — инвариантная скорость Вселенной — была отождествлена в теории Эйнштейна со скоростью c света *в вакууме*. Это отождествление было неизбежным, как мы объясняли при обсуждении уравнений электромагнетизма. Но хотя верно утверждать, что теория Эйнштейна выросла бы в классическую науку, если бы c ,

инвариантная скорость Вселенной, была бесконечной, а не конечной, было бы неправильно делать из этого вывод, что если бы скорость света была бесконечной, мы столкнулись бы с миром, каким его представляла классическая наука. Как мы знаем, в классической науке скорость света *не* была бесконечной; бесконечной была только инвариантная скорость; и эти две скорости не имели ничего общего.

Если бы мы хотели представить себе мир, в котором и скорость света, и инвариантная скорость были бы бесконечными, нам пришлось бы сделать c бесконечной в уравнениях электромагнетизма, поскольку в этих уравнениях c представляет скорость света. Но тогда все члены этих уравнений, в которых c входила в знаменателе, исчезли бы. Поскольку эти члены отвечают за индукцию, в мире, в котором скорость света была бы бесконечной, такого явления, как индукция, не могло бы существовать. Не было бы динамо-машин, не было бы радио; фактически, не было бы и лучей света, поскольку свет сам по себе является явлением электромагнитной индукции. Очевидно, что такой мир не был бы тем миром, в котором мы живем.

Подводя итог, мы должны сказать, что в классической науке скорость света c конечна, а инвариантная скорость бесконечна. В теории относительности c , скорость света, как и прежде, конечна, но она идентична инвариантной скорости, которая, следовательно, также конечна. Мы также понимаем глубинную причину любопытной сложной формы релятивистских преобразований пространства и времени при переходе от одной галилеевой системы отсчета к другой (преобразования Лоренца-Эйнштейна) в отличие от классических преобразований. Теперь мы понимаем, что эта более сложная форма обусловлена тем, что реальный мир является пространством-временем, а не отдельным пространством и временем, как считалось ранее.

Прежде чем завершить эту главу, мы считаем целесообразным более подробно обсудить один момент. Он касается чисто формальных определений в физике, и в частности определения критической скорости. Мы уже упоминали, что определения, которые якобы обходятся без использования мерной линейки, часов и физических измерений в целом, признаны невозможными. Эйнштейн неоднократно подчеркивал этот факт.

Возможно, эти моменты будут лучше поняты, если мы обсудим иллюстрацию чисто формального определения, данного доктором Уайтхедом. Так, он пишет:

«Эксперимент показывает, что эта критическая максимальная скорость является близким приближением к скорости света *в вакууме*, но ее определение никоим образом не зависит от каких-либо ссылок на свет».^[67]

Любой физик с готовностью согласился бы с этим утверждением, если бы доктор Уайтхед просто хотел избежать ссылки на распространение света в определении критической скорости в теории относительности. Ведь, как мы видели, критическая или максимальная скорость может быть определена и была определена другими физическими средствами. Действительно, насколько нам известно, существование критической скорости не зависит от скорости света. Но, судя по его работам, идея Уайтхеда заключается в том, чтобы полностью исключить физические измерения из основных определений физики; отсюда и его определение, или, по крайней мере, наиболее близкое к определению, которое мы смогли найти в его работах:

«Физическое значение понятия « c » также хорошо известно: любая скорость, которая в любой системе отсчета времени имеет величину c , имеет ту же величину в любой другой системе отсчета времени. Никакие предположения о существовании скорости с этим

свойством или об электромагнитной инвариантности не входили в вывод кинематических уравнений гиперболического типа».

Обратите внимание, что в этом определении доктор Уайтхед не отождествил критическую скорость (c) ни с постоянной Максвелла, ни с какой-либо другой физической величиной. Таким образом, критическая скорость (c) является некоторой неопределенной величиной; и мы можем выразить определение доктора Уайтхеда более понятным языком следующим образом:

«Критическая или максимальная скорость — это скорость неопределенного значения, которая может требоваться или не требоваться мировой структурой. Однако, если она существует, она будет задана одной и той же инвариантной величиной в любой галилеевой системе отсчета, каким бы ни было значение этой инвариантной величины».

В этом определении нет никакой ссылки на какие-либо физические явления или законы, и именно этот аспект, по мнению Уайтхеда, составляет его превосходство. Но проблема заключается в том, что если отбросить физические измерения или существование физических законов, установленных эмпирически с помощью стержня, часов и т. д., то определение оказывается вообще не определением. Ибо каким же является определение, которое не сообщает нам величину скорости, которую оно предлагает определить? Например, определение скорости звука — это скорость в столько-то футов в секунду при определенных условиях наблюдения. Определение, которое не дает нам этой информации, не является определением скорости звука.

Теперь можно утверждать, что точная величина неизменной скорости имеет второстепенное значение, а ее свойство неизменности (упомянутое в определении) является фундаментальным моментом. Однако мы можем с уверенностью сказать, что ни один физик никогда не согласился бы с этой точкой зрения. Все наше представление о природе зависит в основном от значения этой неизменной скорости.

Если она конечна и, кроме того, равна постоянной Максвелла, а значит, скорости света в вакууме, мы должны представить себе мир пространства-времени, в котором законы природы будут подчиняться определенным жестким условиям. Кроме того, одновременность, длина и продолжительность будут относительными.

Если инвариантная скорость будет конечной величиной, превышающей значение постоянной Максвелла, мы по-прежнему будем иметь мир пространства-времени в расширенном смысле, но относительность скорости не будет действовать, и мы сможем определять нашу абсолютную скорость в пространстве. Жесткие ограничения, налагаемые на законы природы, больше не будут существовать, поскольку законы электромагнетизма, безусловно, будут противоречить этим ограничениям. Вся структура теории Эйнштейна была бы разрушена.

Наконец, если бы эта инвариантная скорость была бесконечной, мы имели бы отдельное пространство и время классической науки, предполагающие абсолютность одновременности, длины и продолжительности. В математических выводах доктора Уайтхеда нет ничего, что указывало бы на то, какую из этих величин должна иметь инвариантная скорость; она может быть даже мнимым числом.

В любом случае, мы видим, что точная величина инвариантной скорости имеет не малое значение; следовательно, она должна быть обязательно определена в определении. Однако эта важная информация отсутствует в определении доктора Уайтхеда, поскольку оно совместимо со всем классом возможных инвариантных скоростей от нуля до бесконечности,

точно так же, как определение Нью-Йорка как «города у моря» дает нам целый класс возможных городов. Определения такого рода являются неоднозначными, они неопределенны и, следовательно, не являются определениями вовсе. Лучшее, что можно сказать о них, это то, что они представляют собой частичные описания.⁽¹⁶⁸¹⁾

До этого момента мы обсуждали определение Уайтхеда в свете самодостаточного математического определения, которое не требует обращения к физическим измерениям для приобретения определенного значения. Таково, по-видимому, было его намерение. При таком толковании определение, как мы видели, является неудачным.

Поэтому должно быть очевидно, что единственным способом придать ему определенность является установление существования, а затем и величины этой неуловимой критической скорости. *Но это можно сделать только с помощью физических измерений.* Не имеет значения, будут ли измерения проводиться с помощью стержней, часов, лучей света или электромагнитных средств. В любом случае они будут физическими; следовательно, когда наконец будет получено значение инвариантной скорости, эта величина будет зафиксирована, определена или определена с помощью физических измерений. Чисто формальное определение доктора Уайтхеда не может освободить нас от этого ограничения. Поэтому кажется странным, что он критикует Эйнштейна за процедуру, которой он сам не может избежать.

В любом случае, поскольку ученые еще много лет назад убедились, что в вопросах физических определений физические измерения неизбежны, их целью всегда было выбрать определение, которое бы определяло неизвестную величину с помощью уже известных величин. Если этот метод не срабатывает, они пытаются представить свое определение в форме, которая поможет физику, направляя его к его цели.

Если учесть эти требования, становится ясно, что определение Эйнштейна неизменной скорости как скорости света *в вакууме* трудно улучшить. Чтобы понять этот момент, сравним ситуацию экспериментатора, которому было бы дано определение доктора Уайтхеда, а затем определение Эйнштейна.

Как мы помним, определение доктора Уайтхеда сообщает экспериментатору, что он может распознать критическую скорость, когда его измерения успешно обнаружат инвариантную скорость. Если это не удастся, он также может установить ее значение, как только его измерения успешно обнаружат следы неевклидовости в законе сложения скоростей. Но это, очевидно, очень окольный способ помочь ему. Экспериментатор теперь будет вынужден стрелять пулями с разными скоростями и пытаться обнаружить следы неевклидовости. Если его попытки окажутся безуспешными, он не сможет сделать никаких выводов, поскольку всегда можно предположить, что неизменная скорость была слишком велика, чтобы оказать заметное влияние на скорости, которыми он располагает. Даже если бы он обнаружил то, что могло бы показаться неевклидовостью, как он мог бы знать, что этот эффект не был вызван вторичными причинами? В этой связи мы помним, что ни Френель, ни Лоренц никогда не считали необходимым приписывать результат эксперимента Физо неевклидовому составу скоростей.⁽¹⁶⁹¹⁾ Френель приписывал этот результат взаимодействиям между эфиром и материей, а Лоренц — электронному строению материи. Короче говоря, определение доктора Уайтхеда ставит экспериментатора в незавидное положение человека, ищущего иголку в стоге сена, не имея утешения от осознания того, что иголка действительно там есть. Из этого мы видим, что определение, если его интерпретировать в чисто формальном смысле, является неоднозначным и ничего

нам не говорит, а если интерпретировать его в физическом смысле, то оно мало полезно для физика.

А теперь рассмотрим определение Эйнштейна. Во-первых, можно отметить, что если бы, по его мнению, сама по себе инвариантность критической или максимальной скорости представляла собой правильное определение, он дал бы его двадцать лет назад, поскольку эта инвариантность составляет АБВ его теории. Однако, как мы знаем, хотя он часто называет максимальную скорость инвариантной скоростью и наоборот, он счел необходимым дополнить это частичное описание правильным определением.

Для Эйнштейна важным моментом было не столько дать физическую иллюстрацию этой инвариантной скорости, которая, возможно, никогда не будет обнаружена в природе как физическое явление. (Точно так же бесконечная скорость классической науки никогда не была дана каким-либо физическим распространением). Важным моментом было то, что он должен был обосновать свое убеждение в том, что структура мира требует существования критической скорости такого рода; и под ее существованием мы подразумеваем, что если бы она когда-либо была реализована, она должна была бы оказаться непревзойденным максимумом и инвариантом.

Теперь мы можем понять преимущество определения Эйнштейна. Во-первых, он утверждает, что электромагнитные эксперименты установили относительность скорости. Это, в свою очередь, влечет за собой сохранение формы всех законов природы, в частности, законов электромагнетизма Максвелла. Отсюда следует, что должна существовать критическая инвариантная скорость, задаваемая константой c , которая входит в уравнения Максвелла. Поскольку Максвелл доказал, что скорость света *в вакууме* (c) и скорость света *в пространстве* (velocity of light in *vacuo*) являются одним и тем же, инвариантная скорость определяется этой скоростью света. Таким образом, благодаря определению Эйнштейна мы знаем, что структура мира требует существования конечной инвариантной скорости, а не бесконечной, как считалось в классической науке. Кроме того, мы знаем, что эта скорость задается знаменитой константой Максвелла c , значение которой было точно определено задолго до появления теории относительности. Другими словами, Эйнштейн определяет неизвестное с помощью известного, а не с помощью неоднозначного.

Возвращаясь к нашей иллюстрации с иголкой в стоге сена, Эйнштейн не только дал нам уверенность в том, что игла там есть, но и точно сказал, где ее искать. По этой причине его определение, в отличие от определения доктора Уайтхеда, удовлетворяет требованиям физической науки.

На этих страницах мы довольно подробно обсудили определение Уайтхеда, потому что оно иллюстрирует опасность путаницы между математикой и физикой. Так, в то время как в математике мы можем постулировать все, что угодно (с некоторыми оговорками), а затем дедуктивно приходить к выводам, в физике такой подход невозможен. Мы должны ориентироваться на эксперимент и формулировать наши предпосылки в соответствии с ним. В результате, в то время как в математике мы имеем дело с формальными возможностями, в физике мы ограничены анализом фактических данных. И в каждом случае переход от возможностей математики к реальности физики требует введения физических измерений.

В этой связи очень важно понимать разницу между физическим и математическим определением. Возьмем, к примеру, число n в математике. Мы можем определить его как отношение длины окружности к ее диаметру в евклидовой геометрии. Не проводя

физических измерений, мы можем вывести из этого определения, используя чисто математические средства, точное значение с любой степенью приближения, которую мы пожелаем. Таким образом, определение не приводит к двусмысленности, а значит, является верным.

С другой стороны, попробуйте дать физическое определение с помощью какого-либо аналогичного метода — скажем, определение «грамма» или «дина». Чисто логический тип определения не работает, и мы вынуждены прибегать к физическим определениям. Соответственно, мы определяем грамм как массу кубического сантиметра дистиллированной воды при определенных условиях температуры и давления.

И почему чисто логическое определение было возможно в математике, а в физике оказалось неудачным? Просто потому, что в математике — например, в случае — законы евклидовой геометрии были приняты с самого начала, тогда как в физике предварительная информация такого рода нам недоступна. То же самое и со всеми величинами и константами физики. Невозможно заранее определить логическими средствами значение инвариантной скорости, газовой константы, размера Земли или электрона. В каждом случае мы должны прибегать к тем или иным физическим измерениям, поскольку константы физики не имеют характера рациональной необходимости.

Большая часть критики, направленной против использования Эйнштейном стержней, часов и распространения света, возникает из-за непонимания этого фундаментального момента. Чисто логические, неэмпирические определения в физике могут привести только к двусмысленности. Что касается теории относительности, то она является частью физики; она не претендует и не стремится быть чем-то другим; а теория физики, которая избегала бы физических измерений, является столь же разумной концепцией, как лес без деревьев.

ГЛАВА XX

НЕОБРАТИМОСТЬ ВРЕМЕНИ

При обсуждении существования конечной инвариантной скорости в природе мы видели, что наличие этой скорости разрушит нашу веру в абсолютную одновременность. Таким образом, если два события происходят в разных местах, мы больше не можем придавать какое-либо универсальное значение мнению, что эти два события произошли в один и тот же момент времени или в два разных момента. Другими словами, не существует абсолютных часов, которые давали бы нам точное время во всех точках Вселенной. В зависимости от движения наблюдателя два события, одновременные для одного, могут следовать друг за другом для другого.

В этом месте мы должны остерегаться возможной путаницы. Можно возразить: «В этой относительности одновременности и последовательности наших восприятий нет ничего нового, поскольку мы сталкиваемся с такими примерами даже в классической науке. Например, если два взрыва происходят в разных местах, то, изменив наше положение как наблюдателей, мы можем воспринимать два шума то одновременно, то последовательно». Но такие аргументы свидетельствовали бы о том, что революционное понятие относительности одновременности не было понято.

Так, в примере с двумя взрывами, происходящими в разных местах на поверхности Земли, хотя совершенно верно, что порядок следования, в котором мы слышим или видим эти взрывы, будет зависеть от нашего положения как наблюдателей, с другой стороны, если мы примем во внимание время, необходимое звуковым или световым волнам для преодоления расстояний, отделяющих нас от двух взрывов, мы всегда сможем однозначно определить, произошли ли два взрыва одновременно или последовательно. В классической науке абсолютным считался не порядок или одновременность наших восприятий, а исключительно одновременность или порядок, в котором эти взрывы или события произошли во внешнем мире.

Теперь, согласно теории относительности, не только одновременность наших восприятий является относительной, но, кроме того, даже если мы принимаем во внимание скорость, с которой звуковые или световые волны продвигаются к нам, все равно невозможно решить, являются ли два события (считающиеся существующими во внешнем мире независимо от любого наблюдателя) одновременными или нет; ведь наши вычисления покажут, что эта одновременность во внешнем мире будет варьироваться от одного наблюдателя к другому.

Относительность одновременности приводит нас к смежной теме относительности порядка следования двух событий, происходящих в разных местах. Здесь невозможно установить жесткое правило, поскольку мы увидим, что теория заставляет нас признать, что в некоторых случаях порядок следования является неопределенным или относительным по отношению к нашему движению, а в других — абсолютным, оставаясь одинаковым для всех наблюдателей.

Эта проблема достаточно важна, чтобы заслуживать более подробного объяснения. Наше осознание хода времени является одним из самых фундаментальных фактов сознания.

Время не только непрерывно течет, но и всегда течет в одном направлении. Теория относительности не вносит ничего нового в эту загадку однонаправленного хода времени, поэтому мы можем обсуждать эту проблему с точки зрения классической науки. Предположим, что в бутылку мы помещаем два слоя порошка, один белый, а другой черный. Если мы достаточно долго встряхиваем смесь, то знаем, что в конечном итоге получим однородную серую смесь. Мы могли бы предвидеть этот результат, не проводя эксперимента. Ведь если мы рассмотрим различные способы распределения частиц порошка в бутылке, то у нас будет достаточно оснований утверждать, что все распределения одинаково вероятны. Но так сложилось, что в подавляющем большинстве случаев возможных схем распределения в результате получается однородная серая смесь. Поэтому вероятность подсказывает, что при достаточно длительном встряхивании бутылки в конце концов получится однородная серая смесь. Когда это однородное состояние было бы достигнуто, только один раз за миллионы лет черно-белое разделение появилось бы снова, и то лишь на мгновение. Мы можем выразить эти факты, сказав, что общая тенденция будет заключаться в переходе от неоднородного (черные и белые слои) к однородному (однородная серая смесь).

Рассмотренный нами пример является чрезвычайно простым, но поскольку приведенные аргументы кажутся универсально действительными, мы можем сказать, что природные явления представляют собой однонаправленное движение вперед, переходя от состояний с меньшей вероятностью к состояниям с большей вероятностью. Таким образом, мы можем отождествить состояния с меньшей вероятностью с прошлым, а состояния с большей вероятностью — с будущим. Таким образом, направление течения времени может быть определено физически с точки зрения вероятности, что требует лишь обращения к достаточным основаниям и операциям подсчета.

Такое определение было предложено Больцманом (основателем кинетической теории газов). По его мнению, вселенная переходила от состояний с меньшей вероятностью к состояниям с максимальной вероятностью, и направление этого перехода определяло направление времени. Как можно понять из предыдущих объяснений, однонаправленный ход явлений следует объяснять тем, что явления необратимы, *т. е.* различные состояния не имеют одинаковой вероятности.

Правда, существуют также типы явлений, для которых все состояния имеют одинаковую вероятность. В этом случае привилегированного направления не существует, и явления называются *обратимыми*. Адиабатическое преобразование в идеальных условиях и вращение тела в отсутствие трения являются примерами обратимых процессов; такие явления, конечно, не могут определять направление времени.

Однако подавляющее большинство явлений в природе относятся к необратимому типу; в них привилегированным является определенное направление изменения. Когда мы хотим заставить явление противоречить его естественной тенденции, необходимо приложить усилие. Все явления, сопровождающиеся трением, относятся к необратимому типу, поскольку движение генерирует тепло за счет трения, а тепло не может быть использовано для восстановления движения. Пример с двумя порошками также иллюстрирует необратимый тип явления, поскольку естественная эволюция шла от гетерогенности к гомогенности. Конечно, было бы возможно обратить процесс вспять, но только с помощью какой-то разумной деятельности, сортирующей частицы и распределяющей их в соответствии с состояниями меньшей вероятности. Действие такого рода демона, демона Максвелла, привело бы к обращению направления необратимого явления, так что

направление времени, казалось бы, изменилось бы. Однако, разумеется, демон Максвелла — всего лишь вымысел.

На примере двух порошков мы можем легко понять причину необратимости, но этот принцип был открыт не с помощью этого метода. Чтобы проследить происхождение того, что стало одним из самых фундаментальных принципов науки, мы должны вернуться к Карно и его исследованиям цикла парового двигателя. Известный принцип Карно, касающийся эффективности парового двигателя, был показан Клаузиусом как частный случай общего физического принципа, который можно сформулировать следующим образом: «Тепло не может самопроизвольно перетекать от более холодного тела к более горячему, но всегда стремится к более низким уровням температуры».

Введя новое понятие, называемое **энтропией**, определяемое как отношение количества тепла к температуре, Клаузиус смог придать этому принципу более общую форму. Тогда он стал *принципом энтропии*, согласно которому при любом необратимом изменении энтропия системы увеличивается; только в случае обратимого изменения она остается постоянной. Однако ни при каких обстоятельствах общая энтропия не уменьшается. Таким образом, все природные процессы сопровождаются увеличением энтропии, поскольку ни один из них не является идеально обратимым.

Теперь, когда мы рассматриваем принцип энтропии в его связи с концепцией энергии, мы обнаруживаем, что он подразумевает постоянную потерю потенциальной энергии системы. Таким образом, энергия постоянно рассеивается или, точнее говоря, *деградирует* до самой низкой формы, а именно до беспорядочного молекулярного возбуждения, то есть тепла; отсюда и название «*принцип деградации энергии*», под которым он часто упоминается.

Этот принцип имеет настолько важное значение, что его называли *вторым принципом термодинамики*; название «*первый принцип термодинамики*» зарезервировано для принципа сохранения энергии. Важно отметить, что эти два принципа, принцип деградации и принцип сохранения, не противоречат друг другу. В количественном отношении энергия сохраняется; деградация происходит исключительно в качественном отношении, или в отношении потенциальной энергии, или в отношении ее способности выполнять работу.

Теперь перейдем к вкладу Больцмана. Энтропия, как ее определил Клаузиус, была чрезвычайно заумным термодинамическим понятием. Больцман, основывая свои выводы на кинетической теории газов, сумел дать более конкретное представление об энтропии, определив ее как логарифм вероятности. Таким образом, если мы признаем правильность кинетической теории, принцип энтропии становится принципом максимальной вероятности, теряя тем самым свой статус абсолютной действительности и приобретая статистическое значение. Представление энтропии в терминах вероятности позволяет легко применять этот принцип к проблемам молекулярной физики и атомистической физики в целом. Можно отметить, что именно следуя этому методу, или, вернее, комбинируя два определения энтропии, Планк установил свою формулу квантового излучения, что привело его к квантовой теории. Разумеется, этот принцип действует только при рассмотрении чрезвычайно больших чисел. Другими словами, это принцип, управляющий хаосом, или, опять же, статистический принцип.

Можно видеть, что принцип энтропии, утверждая, что мир постоянно переходит от состояний меньшей вероятности к состояниям большей вероятности, указывает на то, что когда достигается состояние максимальной вероятности или энтропии, дальнейшие

изменения не могут происходить. Тогда наступает безмолвная неподвижность или смерть. В этих условиях может показаться, что принцип несовместим с существованием исходного состояния минимальной вероятности. Но здесь следует помнить, что принципы науки не стремятся к какой-либо абсолютной мере ценности. Все, что мы можем требовать, — это чтобы они удовлетворялись в очень ограниченной области, которую может исследовать наука. Однако в случае принципа энтропии нет причин опасаться какого-либо конфликта с возможностью возрождения или повторного сотворения. Например, при встряхивании порошков мы видели, что в результате получится однородная серая смесь; но если бы мы продолжали встряхивать бутылку в течение триллионов веков, то в какой-то момент черное и белое снова разделились бы, и цикл начался бы заново. Короче говоря, энтропия будет постоянно увеличиваться, но раз в триллион лет она может внезапно уменьшиться, а затем снова начать увеличиваться. [Можно](#) отметить, что, хотя нет оснований предполагать, что жизненные явления каким-либо образом противоречат принципу энтропии, безопаснее ограничить этот принцип физическим миром. В случае биологических явлений вопросы вероятности слишком сложны, чтобы их можно было рассматривать с какой-либо степенью уверенности при современном состоянии наших знаний. Только в некоторых особых случаях, таких как те, которые связаны с наблюдениями Менделя, рассмотрение вероятности принесло какую-либо пользу.^[170]

Теперь мы хотим подчеркнуть два момента. Во-первых, однонаправленное течение времени навязывается общим опытом. Во-вторых, принцип энтропии подсказывается как опытом, так и аргументами рационального порядка. Мы не утверждаем, что принцип энтропии, даже если его свести к рангу статистического принципа, можно с уверенностью считать универсально действительным. Совершенно не исключено, что в некоторых явлениях, о которых пока ничего не известно, может действовать какая-то противодействующая сила. Тем не менее, можно отметить, что отрицание принципа энтропии, по крайней мере в отношении тех физических явлений, которыми занимается наука, остановило бы дальнейший прогресс.

Например, мы легко можем понять, в какую затруднительную ситуацию мы бы попали, если бы произошло обратное течение времени. Помимо таких тривиальных примеров, как курица, превращающаяся в цыпленка и исчезающая в яйце, или следствия, становящиеся причинами, необходимо упомянуть ряд более научных соображений. Явления теперь переходили бы из состояний максимальной вероятности в состояния минимальной вероятности; мы не могли бы просто поменять местами значения слов «максимальный» и «минимальный», поскольку они определяются чисто числовыми соображениями, которые совершенно не имеют отношения к направлению течения времени. Следовательно, явления переходили бы из однородного состояния в неоднородное. Но в то время как однородное состояние является уникальным и может быть предопределено, неоднородное состояние является более или менее произвольным и затрудняет предвидение. Так, в случае двух порошков однородное состояние представляет собой однородную серую смесь, в то время как неоднородное состояние может представлять собой чередующуюся последовательность слоев, или только два слоя, или сопоставление черных и белых кубиков. В конечном итоге предвидение станет практически невозможным.

Из этого мы можем легко предвидеть, что если теория Эйнштейна сделает направление хода времени неопределенным, если прошлое и будущее будут взаимозаменяемыми в зависимости от наших условий движения, то последует крайний хаос. Однако нам не нужно бояться этого, потому что, как мы увидим, теория относительности не приводит к обращению причинности. Давайте теперь рассмотрим теорию пространства-времени более подробно.

Когда мы рассматриваем четырехмерное пространственно-временное континуум, где пространство и время находятся на равных, нет ничего, что указывало бы на течение времени или привилегированное направление этого течения. Поэтому, чтобы привести теорию в соответствие с фактами опыта, необходимо постулировать, что наше сознание поднимается вдоль мировой линии нашего тела через пространство-время, обнаруживая события на своем пути. Очевидно, мы могли бы изменить представление, предположив, что именно пространство-время движется мимо нашего сознания; мы могли бы также утверждать, что сама текстура пространства-времени обладает динамическими свойствами, подталкивающими наше сознание в направлении времени. Но, учитывая неопределенность предмета, спекуляции на эту тему не принесут большого пользы.

Теперь, когда вдоль мировых линий, по которым движется каждый из нас, было определено общее направление от прошлого к будущему, мы обнаруживаем, что теория относительности требует абсолютного прошлого и абсолютного будущего (хотя и не абсолютного настоящего). Точнее говоря, мы обнаруживаем, что в то время как в соответствии с природой наших относительных движений некоторые события могут казаться одновременными, или предшествующими и последующими, или последующими и предшествующими, другие неизменно будут представляться в том же порядке временной последовательности, независимо от нашего движения.

Это разделение между событиями, порядок возникновения которых является абсолютным, и событиями, порядок которых является относительным, получается следующим образом: всякий раз, когда луч света может пройти от одного события ко второму, покидая первое событие в момент его возникновения и достигая второго события до или даже в момент его возникновения, временная последовательность двух событий не может быть обращена относительным движением; она является абсолютной.

С другой стороны, если луч света не может удовлетворить предыдущим требованиям из-за слишком большого расстояния или слишком малого промежутка времени, разделяющего два события, временная последовательность двух событий становится неопределенной. Один наблюдатель может утверждать, что **A** предшествует **B**, в то время как другой может утверждать, что **B** предшествует **A**, а третий может утверждать, что **A** и **B** являются одновременными. Если мы помним, что в теории Эйнштейна никакое активное воздействие, никакое распространение не может передаваться со скоростью, превышающей скорость света, то мы видим, что когда луч света не может пройти от **A** к **B**, покидая **A**, когда производится **A**, и достигая **B**, когда или до того, как производится **B**, нам совершенно невозможно предположить, что **A** повлияло на **B**. Между этими двумя событиями не может существовать никакой причинно-следственной связи. Таким образом, мы видим, что когда два события связаны причинно-следственной связью, их порядок возникновения останется неизменным для всех наблюдателей. Только в том случае, когда причинно-следственная связь невозможна, временная последовательность событий может быть изменена на противоположную соответствующим движением наблюдателя.

Не потому, что между двумя событиями существует причинно-следственная связь, порядок является необратимым; необратимость обусловлена исключительно пространственно-временным разделением событий. Что касается причинно-следственной связи, то она может существовать, а может и не существовать. Единственная причина, по которой мы упоминаем причинно-следственные связи в связи с этой проблемой, заключается в том, чтобы показать, что в теории относительности нет ничего, что

указывало бы на обратимость причинности; следовательно, хотя теория Эйнштейна предполагает относительность одновременности и в некоторых случаях относительность временной последовательности, нет опасности, что причина будет выглядеть как следствие или наоборот. В частности, никакое относительное движение наблюдателя не может заставить его поверить, что стакан, который мы уронили, на самом деле подскочил с пола в нашу руку. Нет опасности, что черный и белый порошки, которые мы смешали в серую смесь, в результате изменения нашего относительного движения снова разделятся на черный и белый. Короче говоря, нет опасности, что принцип энтропии будет опровергнут.

Можно также добавить, что в то время как в классической науке, ввиду возможного существования воздействий, передаваемых с бесконечной скоростью, любые два события, происходящие в пространстве, могли быть представлены как причинно связанные или, по крайней мере, как связанные, теория Эйнштейна, требуя, чтобы скорость света была непревзойденной, позволяет нам ограничить случаи возможных причинно-следственных связей и тем самым лучше понять перекрестные влияния, которые могут действовать во Вселенной.

ГЛАВА XXI

РЕАЛЬНОСТЬ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИН И УДЛИНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ

Перейдем теперь к вопросу о длинах и продолжительности. Рассмотрим жесткий стержень, лежащий на столе, и предположим, что и стол, и стержень удаляются от нас с постоянной скоростью по прямой линии. Сокращение длин означает, что и стержень, и стол будут казаться нам сокращенными из-за их относительного движения по отношению к нам.

Здесь мы должны подчеркнуть тот факт, что это сокращение не имеет ничего общего с движением стержня в пространстве или эфире. Как мы знаем, движение, по крайней мере галилеево движение, в пространстве не имеет смысла. Оно является чисто относительным, так что точно такие же эффекты сокращения произошли бы, если бы мы представили себе, что стол и стержень находятся в покое, а наблюдатель удаляется от них. Отсюда следует, что наблюдатель, прикрепленный к стержню, не заметил бы никакого сокращения, хотя его друг, движущийся относительно него, утверждал бы, что сокращение произошло.

Природа этого сокращения, очевидно, довольно загадочна, и вопрос заключается в том, чтобы определить его реальность. Здесь мы сталкиваемся с трудностью определить, что мы хотим передать словом «реальность»; в некоторых отношениях сокращение стержня является физической реальностью, в других — вымыслом, но ни в коем случае не иллюзией.

Рассмотрим проблему иллюзий. Например, мы испытываем совокупность зрительных впечатлений, которые без колебаний приписываем наличию стола, расположенного «там, в комнате». Однако все, в чем мы можем быть уверены, — это то, что мы испытали определенные зрительные впечатления; наша вера в существование стола, расположенного «там», является результатом умозаключения, суждения, сформулированного в попытке приписать причину нашим зрительным ощущениям. Благодаря ассоциации идей и воспоминаниям о прошлом опыте мы считаем оправданным утверждать, что стол «там» существует так, как мы его видим. В большинстве случаев наше суждение будет правильным, но в некоторых случаях оно будет ошибочным. Так будет, если мы будем смотреть на отражение стола в зеркале. Иллюзия, таким образом, является ошибкой суждения. И что побуждает нас утверждать, что наша вера в объект за зеркалом является иллюзией? Очевидно, тот факт, что при проверке этого вопроса различными способами оказывается невозможным приписать столу какое-либо существование в том месте, где мы утверждаем, что видим его в общепринятом объективном мире науки. Точно так же мы видим мираж и интерпретируем наши ощущения как означающие наличие воды. Однако если бы метеорит упал в воду, он не казался бы погашенным водами озера. Подобные наблюдения косвенного характера в конечном итоге заставили бы нас признать, что наше первоначальное суждение было ошибочным и что перед нами нет воды.

А теперь давайте рассмотрим сокращение Фитцджеральда. Является ли оно иллюзией? На этот вопрос мы должны без колебаний ответить отрицательно. Мало того, что мы должны были бы заметить сокращение, если бы наши глаза были способны делать моментальные снимки быстро движущегося объекта, но и каждый мыслимый физический эксперимент, проведенный в нашей системе отсчета, показал бы, что сокращение физически

присутствует. И все же мы сказали, что это сокращение существенно отличается от того, которое рассматривал Лоренц, поскольку последнее было вызвано реальным сжатием, вызванным движением объекта через неподвижный эфир. Объяснение этой дилеммы заключается в следующем:

В теории Эйнштейна стержень сокращается, но мы должны добавить, что это сокращение имеет место только в пространстве системы отсчета, относительно которой стержень находится в движении. В пространстве системы отсчета, сопровождающей стержень в его движении, сокращения не произойдет. Таким образом, мы видим, что, поскольку не существует привилегированного пространства, а есть только «мое пространство», «твое пространство», «его пространство», у стержня нет определенной длины, а есть только длина «для меня», «для тебя» и «для него». Таким образом, сокращение воплощается в двучленном отношении, простирающемся между наблюдателем и наблюдаемым; оно является «относительным». Но, опять же, для данного наблюдателя оно так же реально физически, как стул или стол. Только когда мы рассматриваем сокращение с безличной точки зрения, с точки зрения пространства-времени, не упоминая об условиях наблюдения, сокращение становится *не* иллюзией, а совершенно бессмысленным. Как мы видим, речь идет о концепции пространственной величины, первичных качеств, в форме, совершенно отличной от всего, о чем когда-либо мечтали наука или философия.

Хотя длина, размер и продолжительность являются относительными, теория относительности открыла абсолюты, которые выходят за пределы наблюдателя и остаются одинаковыми для всех. Их можно найти в абсолютном мире пространства-времени; и именно эту мысль Минковский хотел выразить, когда сказал: «Отныне пространство и время сами по себе являются лишь тенями». В отсутствие какого-либо конкретного наблюдателя пространство и время становятся неопределенными, а вместе с ними — длина и продолжительность; то, что пребывает и выходит за пределы наблюдателя, — это нечто в пространстве-времени, и это не длина и не продолжительность. Или, опять же, длины и продолжительности являются проекциями чего-то в абсолютном пространстве-времени на направления пространства и времени наблюдателя. Последние являются неопределенными (до тех пор, пока не будет указана система отсчета наблюдателя), поскольку ни одно пространство и ни одно время не существуют выше всех остальных. Поскольку пространство и время являются неопределенными, то же самое относится и к тем проекциям, которые мы называем длиной и продолжительностью.

Хотя мы, возможно, повторяемся без необходимости, мы не можем не чувствовать, что самым простым способом для неспециалиста понять эти сложные концепции будет вернуться к хорошо известной иллюстрации относительности угла зрения. Когда мы воспринимаем объект, скажем, телеграфный столб, мы видим его под определенным углом, который мы можем назвать углом зрения. Является ли этот угол зрения реальным? Конечно, да; мы можем измерить его и физически определить как угол, образованный двумя евклидовыми прямыми линиями, проходящими между нашим глазом и двумя концами столба. Он реален, но выражает отношение — отношение между положениями наблюдателя и столба. Он, конечно, не является неотъемлемой частью столба, поскольку при изменении положения наблюдателя величина угла зрения меняется, хотя с столбом при этом ничего не происходит.

Угол зрения в классической науке аналогичен расстоянию в теории Эйнштейна. Наш стержень не имеет истинной длины, так же как телеграфный столб не имеет истинного угла зрения. Все значение относительности заключается именно в том, чтобы лишить длину и

продолжительность абсолютных характеристик, которые классическая наука им приписывала. Короче говоря, когда нас спрашивают, действительно ли стержень сократился и потерял часть своей длины, мы можем ответить вопросом, действительно ли телеграфный столб изменился и потерял часть своего угла зрения. Так же как, если мы не укажем положение наблюдателя, угловое расстояние столба не имеет значения и не может ничего сказать нам о столбе, так и теперь, в теории относительности, длина стержня не имеет значения сама по себе и не может ничего сказать нам о стержне.

Все эти аргументы, разработанные на основе длины, аналогичным образом применимы к продолжительности. И длина, и продолжительность являются относительными величинами, не имеющими абсолютного значения во Вселенной.

Критики, как правило, не согласятся с этими утверждениями и будут склонны сказать: «Что за ерунда! Длина стержня имманентна стержню и никоим образом не может быть затронута движением наблюдателя или существованием системы отсчета. Наблюдатель может умереть, система отсчета может исчезнуть; какое все это имеет отношение к длине конкретного объекта, который мы называем стержнем? Длина стержня может *казаться* больше или меньше в зависимости от его относительного движения, но мы не должны путать видимость и реальность. Так, человек, стоящий в 100 ярдах от нас, кажется нам ниже, чем когда он находится рядом, но нам никогда не придет в голову сказать, что он действительно уменьшился в росте. Так же как рост человека не зависит от нашего положения и нашего существования как наблюдателей, так и длина стержня не зависит от нашей относительной скорости».

Теперь мы можем с готовностью признать право критика утверждать, что существование и абсолютные характеристики стержня никоим образом не зависят от движения или существования наблюдателя. Но критик уходит от вопроса, когда без дальнейших размышлений предполагает, что эти абсолютные характеристики выражаются *длиной* стержня. Эта длина вступает в существование только тогда, когда определяется определенное пространство; до этого она не имеет смысла. А в отсутствие наблюдателя не существует такого понятия, как пространство, а есть только четырехмерное пространство-время. Таким образом, абсолютные характеристики стержня относятся к пространству-времени, и это исключает все первичные качества, такие как длина. Конечно, с первого взгляда эту ситуацию нелегко понять, а объяснить ее еще труднее, но, учитывая чрезвычайную важность этого вопроса, мы постараемся прояснить его, немного изменив форму изложения.

Давайте сначала рассмотрим эту проблему с точки зрения классической науки. Представим себе наблюдателя, который уходит от точки P на поверхности Земли. Он останавливается, пройдя расстояние d от точки P . Он поворачивается, оглядывается и видит черную линию, торчащую из земли в точке P , откуда он начал свой путь. Высота линии кажется ему иметь определенную величину; и чтобы точно зафиксировать эту величину, он измеряет прибором точный угловой угол, под которым он видит черную линию. Затем он продолжает свое путешествие, останавливается, снова поворачивается и обнаруживает, что черная линия теперь видна под меньшим угловым углом, поэтому ему кажется, что ее высота уменьшилась. Его первым порывом было бы предположить, что черная линия была вызвана каким-то извивающимся миражом и, хотя она была реальной в той мере, в какой она влияла на его зрение, она не могла иметь объективного существования в какой-либо безличной форме. Однако, даже не возвращаясь к точке P и не исследуя вопрос более тщательно, наш наблюдатель мог бы вскоре обнаружить, что черная линия должна быть

произведена каким-то существующим объектом. Он сделал бы это открытие следующим образом: сопоставив угловое расстояние α , под которым ему казалась черная линия, со своим расстоянием d от точки P , он обнаружил бы, что, где бы он ни стоял, определенное математическое выражение ($m \cdot e \cdot d \times \tan \alpha$), представляющее длину, сохраняло одно и то же неизменное значение. Было бы обнаружено нечто действительно объективное, поскольку, в отличие от углового расстояния и расстояния, которые менялись в зависимости от его положения, здесь была длина, которая была абсолютной, поскольку ее значение выходило за пределы его положения. Он немедленно приписал бы эту абсолютную величину объективному существованию реального жесткого шеста длиной L , стоящего в точке P . Короче говоря, критерием объективности является инвариантность для всех наблюдателей, и эта иллюстрация позволила нам отделить абсолютную длину L шеста от относительного угла зрения α и расстояния d . Классическая наука предполагала, что этот критерий объективности будет действовать во всех случаях, независимо от того, находятся ли наши наблюдатели в покое или в движении. Теория относительности говорит нам, что это не так. Наблюдатель, находящийся в относительном движении, всегда будет воспринимать шест под меньшим углом зрения, так что математическое выражение, якобы дающее длину шеста, больше не будет инвариантным.⁽¹⁷¹⁾ В этих условиях мы снова сталкиваемся с запутанной проблемой: может ли существовать какая-либо универсальная объективность, действительная для всех наблюдателей во вселенной.

Одно можно сказать наверняка. Мы больше не можем приписывать шесту неизменную длину. Эта длина больше не будет имманентной шесту, поскольку невозможно найти неизменное выражение пространственной длины, справедливое для всех наблюдателей и, следовательно, независимое от их существования. Поэтому мы не можем избежать вывода, что пространственная длина сама по себе не может иметь более универсального существования, чем кажущаяся высота или угловое расстояние в классической науке. Если мы не хотим отказаться от всякой надежды обнаружить что-то универсально объективное, нам придется искать некую замену тому абсолютному пространственному расстоянию, в которое верила классическая наука.⁽¹⁷²⁾

Минковский обнаружил, что такая абсолютная величина может быть построена, но она состоит из относительной длины и продолжительности, в которых каждый наблюдатель воспринимает любые два мгновенных события. Точно так же, как классическая наука построила абсолютную пространственную величину, так теперь Минковский построил абсолютную пространственно-временную величину, т. е. интервал Эйнштейна. Объективность наконец-то вновь открыта, хотя эта объективность относится не к пространственным величинам и не к продолжительности, а к сочетанию обоих. Другими словами, аналог абсолютной объективной длины полюса в классической науке теперь дается абсолютным объективным пространственно-временным интервалом. Аналог относительного угла зрения, или кажущейся высоты шеста, в классической науке дается его релятивистской длиной, измеренной наблюдателем; и эта длина не более иллюзия, чем угол зрения. Не проанализировав значение своих слов, критик утверждал, как будто угол зрения, или кажущаяся высота, в классической науке были иллюзией. Но угол зрения не является иллюзией. Иллюзия возникает только из-за ошибочных выводов, когда, отождествив угловое зрение с видимой высотой, мы затем путаем видимую высоту с реальной высотой столба, тем самым приписывая ему слишком короткую длину. Именно эта последняя путаница является неоправданной, поскольку она сводится к смешению углового зрения, или видимой высоты (которая, хотя и реальна для индивидуума, не имеет универсального

значения, а значит, является относительной) с реальной длиной (которая является абсолютной в классической науке).

Точно так же сокращение Фитцджеральда не является иллюзией. Его можно измерить, и оно проявляется физически всеми возможными способами. Но опять же, оно является относительным, поскольку само понятие пространственной величины по сути своей относительно, поскольку в зависимости от нашего движения оно будет иметь то одно значение, то другое. Абсолютным, неизменным является интервал Эйнштейна; и если мы не хотим продолжать говорить о таких тенях, как пространство и время, то только в пространственно-временном мире мы сможем достичь универсальной объективности.

Давайте теперь определим точную природу тех изменений в длине и продолжительности, которые возникнут в результате относительного движения. Уравнения Эйнштейна-Лоренца показывают, что жесткий материальный объект, например, метр, который в состоянии покоя в нашей системе отсчета имеет длину один метр, будет казаться все более и более сжатым в направлении своего относительного движения (сокращение Фитцджеральда) по мере увеличения этой относительной скорости. Если бы относительная скорость достигла скорости света, стержень полностью сплющился бы до нуля.

Точно так же наблюдатель, привязанный к часам, заметил бы, что промежутки между последовательными ударами секундного механизма часов действительно составляют секунды. Но с увеличением относительного движения между часами и наблюдателем эти удары стали бы казаться удлиненными, а при относительной скорости, равной скорости света, два последовательных удара разделяла бы бесконечная продолжительность.

Следует отметить, что это удлинение промежутков времени, определяемых тиканьем часов, не следует объяснять тем, что наблюдатель удаляется все дальше от часов и поэтому ему требуется все больше времени, чтобы осознать эти тиканья. Указанные результаты являются теми, которые будут получены после выполнения всех необходимых поправок. Речь идет исключительно об относительном движении наблюдателя и часов, а не об изменениях их взаимного расстояния. Наши результаты будут точно такими же, независимо от того, приближаемся мы к часам или удаляемся от них, при условии, что величина нашего относительного движения остается неизменной.

Обычно длину и продолжительность, полученные наблюдателем, находящимся в покое по отношению к стержню или часам, обозначают как **собственные** длину и продолжительность. Новичкам, по-видимому, довольно трудно убедить себя в том, что все эти продолжительности, будь то собственные или удлиненные, одинаково реальны. Мы уже объяснили, в какой мере это так, но может быть полезно привести следующую дополнительную иллюстрацию: предположим, что у нас болит голова и эта головная боль длится час, если измерить время по часам. Это будет *собственная продолжительность* головной боли. Теперь мы могли бы быть склонны утверждать, что, поскольку *только мы* страдаем от головной боли, *только мы* в состоянии определить ее продолжительность; и когда какой-нибудь быстро движущийся наблюдатель говорит нам, что мы держали часы в руке в течение недели и что, следовательно, наша головная боль длилась неделю, мы могли бы быть склонны сказать ему, чтобы он занимался своими делами. Но нужно понимать, что, хотя головная боль принадлежит только нам и никто другой не может ее почувствовать за нас, *продолжительность* головной боли является общей собственностью, и любой другой наблюдатель имеет такое же право испытывать ее и измерять, как и мы сами.

ГЛАВА XXII

И ПУТЕШЕСТВИЕ К ЗВЕЗДЕ

Неизбежные рациональные последствия, которые с математической точностью следуют из признания существования пространства-времени как модели Вселенной, часто озадачивают новичков, которые считают эти последствия слишком парадоксальными, чтобы их можно было принять. Конечно, мы должны проводить различие между парадоксом ощущения и парадоксом логики или несоответствием. Любые несоответствия были бы фатальными для рациональной конструкции и означали бы либо ошибки в рассуждениях, либо наличие какого-то фундаментального противоречия в наших исходных посылках. Поэтому, если при анализе любого конкретного примера в теории Эйнштейна мы будем следовать нашим выводам, последовательно принимая две разные альтернативы в нашей точке зрения, обе из которых будут согласовываться с предпосылками теории, и если в конце концов мы сравним полученные таким образом результаты и обнаружим, что они противоречивы, а значит, несогласованны, теория относительности никогда не сможет выжить. Однако маловероятно, что такие несоответствия когда-либо будут обнаружены непрофессионалами, поскольку теория относительности является работой математиков, для которых, более чем для кого-либо другого, точное и последовательное мышление является необходимым условием исследования.

С другой стороны, хотя в теории Эйнштейна не может быть никаких несоответствий или парадоксов логики, это не означает, что выводы теории относительности не могут казаться странными и приводить к парадоксам ощущений. Но еще раз важно различать странности или парадоксы ощущений и несоответствия или парадоксы разума.

Таким образом, важный вопрос, который необходимо решить, заключается в том, являются ли наши привычные представления о времени, пространстве и одновременности рациональной необходимостью или же они являются лишь возможными представлениями среди множества других, столь же возможных. Вопрос, который мы должны решить, аналогичен тому, который Кант предложил решить, когда он заявил, что евклидова геометрия и трехмерное пространство являются *априорными* формами чистого восприятия. Кант был неправ, как без сомнения доказало открытие неевклидовых геометрий. Сегодня Эйнштейн сделал для пространства, времени и движения то, что Риман и Лобачевский сделали только для геометрии пространства. Он предоставил нам модель, столь же рациональную, как и модель классической науки; и эта модель имеет дополнительное преимущество, заключающееся в том, что она согласуется с эмпирическими наблюдениями с высокой степенью точности, а не является просто приблизительной конструкцией, как классическая структура. Таким образом, Эйнштейн косвенно доказал, что наши врожденные классические представления о пространстве, времени, одновременности и движении ни в коем случае не были рациональными необходимостями.

Однако многие люди ошибочно полагают, что теория относительности приводит к логическим парадоксам или несоответствиям. Но когда мы анализируем их аргументы, мы всегда сталкиваемся с одним и тем же ошибочным методом рассуждения. Во многих случаях критики, похоже, имеют очень смутное представление о предпосылках, на которых построена теория. Другие, заявляя, что для целей дискуссии они готовы признать

обоснованность этих предпосылок, по-видимому, забывают о своих благих намерениях, не дойдя до конца обсуждения. Невольно, в самом разгаре своих доказательств, они возвращаются к предпосылкам классической науки и, конечно же, приходят к невыносимым противоречиям, после чего делают вывод, что теория относительности приводит к несогласованным результатам.

Рассмотрим, например, относительность продолжительности. Несколько часов или атомов, которые бьют с одинаковой скоростью и показывают одинаковое время, когда они расположены рядом, смещаются по разным маршрутам к одной и той же конечной точке. Теория относительности требует, чтобы, когда они снова будут расположены рядом, они показывали разное время. Критик сразу же восклицает: «Это несоответствие!» Но где же несоответствие? Несоответствие действительно было бы, если бы Эйнштейн с самого начала постулировал в качестве аксиомы, что время является абсолютным. Фактически, именно это и сделал критик. Но тогда, когда в результате этого необоснованного предположения он обнаруживает, что теория приводит его к несоответствиям, он не должен винить Эйнштейна, поскольку теория *не* противоречит *сама себе* как логическая структура, а противоречит исключительно собственным предположениям критика.

Конечно, источник всех проблем заключается в том, что вера в абсолютность продолжительности стала для нас второй натурой; и нам требуется определенное усилие самоанализа, чтобы понять, что эта вера не имеет рационального обоснования. В конце концов, однако, наши идеи проясняются, и мы признаем, что у нас нет средств *априорно* определить, будет ли время абсолютным или относительным. Мы понимаем, что невозможно с самого начала установить закон в ту или иную сторону, если только мы не хотим заставить природу вписаться в заранее заданные рамки, которые могут ей не подходить.

Единственным способом решить эту проблему является обращение к эксперименту; в данном случае к сверхточному эксперименту, поскольку грубый эксперимент не позволил бы нам прийти к какому-либо решению. Эксперимент с часами, если бы его можно было провести с достаточной точностью, был бы одним из таких экспериментов. Очевидно, было бы неразумно предполагать, что его результат можно заранее знать с уверенностью, потому что если бы люди руководствовались таким убеждением, им не было бы нужды проводить эксперименты. Конечно, мы можем ставить под сомнение вероятность получения определенного результата, основывая свое мнение на предыдущих экспериментах аналогичного характера, но в конечном счете наше понимание природы будет исходить из точного наблюдения фактов, а не из *априорной* метафизики.

К сожалению, как мы уже упоминали ранее, этот эксперимент с часами или атомами не может быть проведен с достаточной точностью, поэтому необходимо рассматривать косвенные методы. Но именно потому, что все косвенные эксперименты, проведенные до сих пор, дали результаты, несовместимые с абсолютностью продолжительности и расстояния, Эйнштейн был вынужден отвергнуть эти вековые убеждения человечества. Соответственно, у нас есть все основания предполагать, что эксперимент с часами подтвердит взгляды Эйнштейна; более того, если бы это не было так, вся теория рухнула бы.

Давайте оставим эти общие рассуждения и рассмотрим эксперимент с часами в более наглядной форме. Мы имеем в виду так называемую *проблему близнецов*. В ней мы рассматриваем братьев-близнецов, один из которых остается на Земле, а другой садится на

ковер-самолет и отправляется в далекую Арктуру. По возвращении он обнаруживает, что его брат состарился и ослабел, а он сам сохранил свою молодость.

Это особое следствие теории было одним из камней преткновения практически для каждого писателя-непрофессионала, который посвятил свое время критике теории относительности. Некоторые утверждают, что Эйнштейн никогда не поддерживал подобную абсурдную идею и что всю вину за эту проблему следует возложить на его слишком увлеченных последователей. Другие заявляют, что эти выводы нарушают правила логики, поскольку приводят к несоответствиям, и что, если теория Эйнштейна приводит к таким результатам, ее следует считать гигантской мистификацией от начала до конца.

Теперь, чтобы избежать каких-либо недоразумений, мы можем упомянуть, что в нашем примере оба близнеца держат в руках часы, которые, когда их положить рядом, отбивают секунды и минуты в совершенном унисоне. Теория Эйнштейна указывает, что часы, которые везет с собой путешествующий близнец, будут отставать по времени, когда их вернут на Землю и снова сравнят с часами, которые остались там, под присмотром неподвижного близнеца. Некоторые критики, такие как Бергсон, хотя и принимают постулат об неизменной скорости света, отрицают, что это замедление хода движущихся часов требуется теорией в каком-либо реальном смысле. Бергсон утверждает, что это всего лишь видимость, математическая иллюзия. Так же как постепенное уменьшение видимого размера человека, удаляющегося от нас, не означает реального уменьшения его роста, так и теперь, когда путешествующий близнец возвращается со своими часами к своему брату на Земле, иллюзия исчезает, и оба близнеца признают, что их часы по-прежнему показывают одно и то же время, полностью совпадая друг с другом.

Невозможно переоценить, насколько эта интерпретация проблемы является неверной. Она не только неверна с точки зрения теории Эйнштейна, но и свидетельствует о колоссальном незнании критиком значения теории математической физики. Здесь необходимо напомнить, что сравнительное замедление часов путешествующего близнеца является неизбежным следствием преобразований Лоренца-Эйнштейна. Поэтому отрицать, что эти преобразования соответствуют тому, что действительно произойдет, тому, что будет обнаружено и измерено самыми точными приборами, означало бы отрицать, что преобразования имеют какую-либо физическую основу. Если мы хотим занять такую позицию, то хорошо; но логическим результатом такой позиции будет отрицание легитимности всей теории; было бы совершенно невозможно сохранить теорию, оспаривая реальное значение преобразований. Еще раз: теория математической физики не является теорией чистой математики. Ее цель и *смысл существования* заключаются не только в построении рациональной схемы какого-то возможного мира, но и в построении той конкретной рациональной схемы конкретного реального мира, в котором мы живем и дышим. Именно по этой причине теория математической физики, в отличие от теории чистой математики, постоянно подвергается проверке экспериментом. Следовательно, если бы преобразования Лоренца-Эйнштейна не дали результатов, которые можно было бы измерить, теория Эйнштейна как средство физического открытия, как координация физических фактов, была бы не только бесполезной, но и полностью неверной, и нам пришлось бы от нее отказаться.

Кроме того, следует также отметить, что каждый точный физический эксперимент, который удалось провести, подтвердил предсказания преобразований Лоренца-Эйнштейна; именно благодаря этому теория не была отвергнута много лет назад. Это само по себе должно предупредить нас о том, что нельзя утверждать, что преобразования не имеют физического значения.

До сих пор мы рассматривали общие вопросы и просто пытались показать, почему решение Бергсона этой проблемы должно быть отвергнуто на основании первоначальных принципов. Оставляя в стороне этот аспект вопроса, полезно рассмотреть формальное доказательство, которое он приводит в поддержку своих утверждений.

Он, по-видимому, понимает, что весь вопрос зависит от меры физической реальности, которая должна быть приписана преобразованиям Лоренца-Эйнштейна. Соответственно, он пытается доказать, что эти преобразования не отражают реальность, а обладают лишь фиктивным математическим значением, не имеющим ничего общего с физическим миром. Он называет их «фантазматическими», утверждая, что математики, не имея философского образования, испытывают серьезные затруднения при попытке интерпретировать свои уравнения и неспособны отличить математические вымыслы от физической реальности. Таким образом, Бергсон приступает к демонстрации фиктивного значения преобразований.

Сначала он приводит ряд аргументов, основанных на принципе относительности движения как такового. Однако уже в первом абзаце он путает относительность движения по Галилею с полной относительностью всех видов движения, ньютоновскую и специальную относительность с визуальной относительностью, скорость с ускорением. Все эти ошибки относятся к самой классической науке; и, очевидно, совершенно невозможно разумно обсуждать теорию Эйнштейна, пока мы не приобретем хотя бы элементарные знания по классической механике. После этой философской демонстрации он переходит к математической, но все, что ему удастся доказать, — это то, что он не имеет ни малейшего представления о самых элементарных свойствах математических преобразований.

Теперь, не вдаваясь в математические детали, давайте попробуем понять, почему часы путешествующего близнеца обязательно должны были замедлиться. Чтобы понять причину, мы должны вернуться к предпосылкам Эйнштейна, и в частности к постулату об инвариантной скорости света (). Этот постулат, как мы уже объясняли несколько раз, гласит, что все галилеевы наблюдатели, находясь в своих соответствующих галилеевых системах отсчета, обнаружат в результате измерений с помощью жестких стержней, что волны света неизменно проходят через их системы отсчета с одинаковой постоянной скоростью 300 000 километров в секунду. Если принять этот постулат, мы должны сделать вывод, что в каждой галилеевой системе отсчета время можно измерить по расстоянию в пространстве, пройденному волной света (расстояние измеряется с помощью жестких стержней, находящихся в покое в системе отсчета). В результате постулат позволяет нам построить своего рода оптические часы. Мы можем, например, рассмотреть два параллельных зеркала, расположенных на фиксированном расстоянии 1,5 километра друг от друга в нашей галилеевой системе отсчета, и предположить, что волна света отражается от одного зеркала к другому и обратно. Эти колебания луча света, всегда покрывающие одно и то же расстояние, требуют равной продолжительности; и в данном случае 100 000 таких двойных колебаний определяют продолжительность одной секунды для той галилеевой системы отсчета, в которой находится оптический прибор. Отныне мы должны рассматривать каждую галилееву систему отсчета как обладающую оптическими часами такого рода, определяющими течение времени для своей собственной системы отсчета.

Давайте теперь проанализируем проблему двух близнецов и предположим, что мы, как наблюдатели, находимся на Земле, скажем, на Северном полюсе. С высокой степенью приближения мы можем считать себя находящимися в покое в невращающейся или

галилеевой системе отсчета. Движущийся наблюдатель также находится в галилеевой системе отсчета, удаляясь от нас со скоростью, которую мы предположим равной примерно четырем пятым скорости света. Он посещает далекую звезду, которая, как мы должны понимать, находится на расстоянии шестнадцати световых лет от нас⁽¹⁷³¹⁾, затем меняет направление своего движения и возвращается на Землю.

И мы, и путешественник имеем оптические часы, которые, если поставить их рядом, имеют точно одинаковые размеры; таким образом, для любого из нас 100 000 колебаний наших соответствующих лучей света в наших соответствующих оптических часах соответствуют одной секунде нашего соответствующего времени. Давайте предположим, что оптические часы путешествующего наблюдателя расположены поперечно по отношению к его движению относительно нас, так что его световые дни колеблются взад и вперед в направлении, перпендикулярном его относительному движению. Что касается путешественника, то лучи света его оптических часов будут колебаться вдоль одной и той же прямой линии длиной 1,5 километра; и если во время всего своего путешествия туда и обратно он обнаружит, что его часы колебались N раз, он будет прав, сказав, что согласно его оптическим часам его путешествие длилось $\frac{N}{100,000}$ секунд. В нашем конкретном примере это составит двадцать лет.

Теперь давайте рассмотрим эту проблему с нашей точки зрения, то есть давайте отнесем все измерения к нашей галилеевой системе, привязанной к Земле. В нашей галилеевой системе колеблющаяся световая волна путешественника не будет совершать движение туда и обратно по одной и той же прямой линии. Она будет следовать по зигзагообразной линии, аналогичной серии V , расположенных вплотную друг к другу. Таким образом, общая длина пути, по которому движется световая волна, должна быть больше, чем в системе отсчета путешественника; в данном числовом примере она будет в два раза больше. Тогда возникает вопрос: «Сколько времени потребуется световой волне путешественника, чтобы описать эту зигзагообразную линию туда и обратно, *если время измеряется в соответствии со стандартами нашей галилеевой системы отсчета, привязанной к Земле?*» Постулат об инвариантной скорости света дает нам немедленный ответ. Поскольку зигзагообразная линия, по которой движется световая волна в нашей системе отсчета, в два раза длиннее, чем последовательность наложенных друг на друга восходящих и нисходящих линий, по которым она движется в системе отсчета путешественника, и поскольку, независимо от того, относительно какой системы отсчета, скорость световой волны по ее пути должна быть одинаковой (инвариантная скорость света во всех галилеевых системах отсчета), то сразу же можно сделать вывод, что общая продолжительность колебаний « N » будет в два раза больше, если измерять ее нами, чем если измерять ее путешественником.

Поскольку эти колебания N начинаются и заканчиваются с началом и концом путешествия, мы должны предположить, что путешествие, которое длилось двадцать лет по мнению путешественника, по нашим оценкам продлилось сорок лет. Другими словами, любое регистрирующее устройство показало бы, когда оба оптических часы были снова поставлены рядом, что наши земные часы выполнили $2N$ колебаний во время путешествия, в то время как движущиеся часы выполнили только половину этого числа, а именно N . Очевидно, что в этом вопросе нет никакой иллюзии, поскольку, как мы уже сказали, колебания двух часов вполне можно было бы зарегистрировать графически, так что мы имели бы дело с определенным перечислением регистраций, которое могла бы проверить любая третья сторона.

Довольно легко понять, почему должны иметь место эти необычные результаты. Причина полностью объясняется этой неизменной скоростью, приписываемой любой

световой волне во всех галилеевых системах отсчета. Если бы не было этого постулата, то сам факт, что общая длина зигзагообразной линии в два раза превышала длину линии, идущей вверх и вниз, не означал бы никакой разницы в продолжительности. Классическая наука предположила бы, что, поскольку путь был в два раза длиннее, скорость световой волны по этому пути была бы в два раза больше, так что в конечном итоге обе продолжительности были бы одинаковыми, что полностью соответствовало бы классическому представлению об уникальности времени. Короче говоря, сравнительное замедление движущихся часов является неизбежной необходимостью, если мы согласны принять действительность постулата об инвариантной скорости. Ни в коем случае нельзя принимать постулат, а затем отрицать его математические следствия. Поэтому, если пример с путешествием к звезде слишком нагружает нашу доверчивость, мы должны отвергнуть постулат об инвариантной скорости и столкнуться со всеми трудностями, которые окружали электродинамику до открытий Эйнштейна.

А теперь мы можем обсудить другой тип критики, не столь неуместный, как критика Бергсона, но все же совершенно ошибочный. Например, утверждается, что все, что нам удалось доказать, — это то, что если каждый галилеевый наблюдатель измеряет время с помощью своих оптических часов, то продолжительность путешествия действительно будет измеряться по-разному в зависимости от наблюдателя, но если бы вместо оптических часов каждый наблюдатель определял продолжительность с помощью обычных механических часов, эти странные расхождения никогда бы не возникли. Другими словами, так называемое замедление времени в системе отсчета путешествующего близнеца было бы полностью обусловлено замедлением *не времени*, а оптических часов, с помощью которых он предлагал измерять время. Всегда в соответствии с этой же критикой, оптические часы измеряли продолжительность только в силу искусственной конвенции, и их показания не могли считаться истинным течением времени. Реальное время течет независимо от любых часов, и утверждать, что произвольно постулированные часы определяют истинное время, было бы столь же разумно, как утверждать, что мы умрем, если забудем завести часы. Другими словами, мы можем настраивать часы по своему усмотрению, ускорять их ход, замедлять его и даже полностью останавливать, но мы будем жить так же, как и раньше.

Единственный способ опровергнуть этот ошибочный аргумент — еще раз проанализировать предпосылки теории относительности. Эйнштейн исходит из предположения, что движение Галилея через эфир является относительным. Отсюда следует, что ни один наблюдатель, привязанный к галилеевой системе отсчета, не может никоим образом установить, находится ли его система в состоянии равномерного прямолинейного движения или в состоянии покоя (специальный принцип относительности). Затем он формулирует свой знаменитый постулат об инвариантной скорости света (300 000 километров в секунду) в любой галилеевой системе отсчета, измеренной наблюдателем, привязанным к этой системе. Этот постулат, как мы видели, позволяет любому галилеевому наблюдателю построить оптические часы и измерить продолжительность времени по отношению к своим часам, а значит, к своей системе отсчета.

Теперь, чтобы ответить на критику, которая обвиняет Эйнштейна в искусственном выборе оптических часов, мы должны исследовать, оправданы ли определения совпадающих продолжительностей, обозначенных оптическими часами. И, во-первых, что мы понимаем под оправданным определением равенства двух последовательных продолжительностей? Было бы оправданным определять равные продолжительности по продолжительности, необходимой телу, падающему вертикально к земле, для преодоления равных евклидовых расстояний в пространстве? Очевидно, нет.

При обсуждении конгруэнтности в общем плане мы увидели, что математический анализ сам по себе не дает нам возможности выделить одно конкретное определение конгруэнтных отрезков пространства или времени; но когда мы объединили физику с математикой, определенные точные методы определения конгруэнтности сразу же наложились на любую данную галилееву систему отсчета. В случае временной конгруэнтности мы сочли необходимым предположить, что любое периодическое явление, находящееся в покое в нашей системе отсчета, в полной изоляции от всех внешних воздействий, должно рассматриваться как проходящее через одно и то же начальное состояние через регулярные конгруэнтные промежутки времени. Это предположение было продиктовано нашей верой в причинность, и под обоснованным определением временной конгруэнтности () мы подразумеваем такое определение, которое удовлетворяет этим следствиям причинности.

Поэтому, когда мы останавливаемся, чтобы рассмотреть, дают ли нам оптические часы Эйнштейна оправданное определение равных последовательных промежутков времени, весь вопрос сводится к решению, являются ли колебания луча света в оптических часах изолированным явлением или, в соответствии с движением галилеевой системы отсчета, в которой находятся часы, определенные возмущающие влияния могут не мешать состоянию изоляции, которое мы приписываем работе часов.

До тех пор, пока не было решено, какое влияние оказывает эфир на объект, движущийся в нем, были все основания полагать, что в случае галилеевой системы отсчета, движущейся в эфире, влияние эфирного ветра будет нарушать свободные колебания лучей света между зеркалами часов. Таким образом, часы не могли считаться изолированными, и их показания были бы бесполезными или, по крайней мере, нуждались бы в корректировке. Но специальный принцип относительности Эйнштейна как раз и имеет целью сообщить нам, что эфир ведет себя так, как будто его не существует, так что любое возмущающее воздействие, которое предполагала классическая наука, было *ipso facto* устранено. Другими словами, если мы принимаем специальный принцип относительности, оптические часы можно считать полностью изолированными; и поэтому их показания должны давать нам абсолютно надежные измерения совпадающих промежутков времени, как того требует принцип причинности.

Из этого следует, что если в галилеевой системе отсчета мы поместим рядом в состоянии покоя оптические часы, вибрирующий атом, кусок радия, постепенно теряющий свою массу, и вертушку, вращающуюся без трения, то определения времени, определяемые всеми этими явлениями, будут идентичными, поскольку все они полностью изолированы от внешних воздействий. Точнее говоря, если атом натрия колеблется столько раз в секунду, сколько измеряют оптические часы его галилеевой системы, он должен колебаться точно столько же раз в секунду (как измеряют часы системы), даже если постоянная скорость галилеевой системы (по отношению к какой-либо стандартной галилеевой системе) была изменена на какую-либо другую постоянную скорость. Короче говоря, все физические явления, находящиеся в покое в системе отсчета, будут развиваться с точно такой же скоростью с точки зрения оптических часов системы отсчета, независимо от величины галилеева движения системы отсчета; поскольку, согласно специальному принципу относительности, это абсолютное галилеево движение совершенно бессмысленно.

Если бы наблюдения случайно доказали, что относительные скорости колебаний атома и часов варьируются в зависимости от галилеевой системы отсчета, в которой мы их установили, у нас было бы физическое средство для различения одной галилеевой системы отсчета от другой, а значит, для определения скорости нашей системы отсчета в эфире; и специальный принцип относительности пришлось бы отбросить. Поэтому, предполагая, что

предпосылки Эйнштейна верны, мы должны согласиться с тем, что колебания оптических часов являются идеальным средством определения совпадающих интервалов времени, которое только возможно получить физикам. Наконец, мы видим, что в любой галилеевой системе отсчета были бы получены точно такие же определения времени, независимо от того, использовали ли мы оптические часы, вертушку, вращающуюся вокруг своей оси без трения, колеблющийся атом или механические часы, при условии, что все эти тела в целом находились бы в покое в нашей галилеевой системе отсчета.

Рассмотрим, таким образом, две галилеевы системы отсчета, каждая из которых содержит оптические часы и волчок, вращающийся без трения вокруг своей оси. Если, когда две системы отсчета приведены в относительный покой, расположенные рядом, оба волчка вращаются с одинаковой скоростью, выполняя по N оборотов в секунду, измеренных по их соответствующим часам, то точно такая же корреляция должна существовать, когда галилеевы системы отсчета движутся в разные стороны. Поэтому не имеет значения, измеряют ли наблюдатели в системах отсчета время с помощью своих оптических часов или с помощью вращений своих волчков.

Теперь планета, вращающаяся вокруг своей оси в космосе, является ни чем иным, как огромным волчком; и если, например, мы стоим в невращающейся точке планеты, скажем, на Северном полюсе (чтобы находиться в галилеевой системе отсчета), мы вполне оправданно можем измерять наши единицы времени по последовательным вращениям нашей планеты относительно неподвижных звезд. Рассмотрим две планеты, вращающиеся с одинаковой скоростью, когда они находятся рядом, и назовем одну из этих планет Землей. Независимо от того, летят ли эти две планеты отдельно или находятся вместе, наблюдатель на любой из планет будет вправе измерять свои единицы времени по собственному вращению планеты. Классическая наука предполагала, что, поскольку время было единым и универсальным, обе планеты всегда будут отсчитывать точно одинаковые единицы времени посредством своих вращений, независимо от того, находятся ли они в относительном движении или в покое, поэтому не имело большого значения, какая именно планета была выбрана. В этих условиях, из соображений удобства, в качестве стандарта была выбрана Земля.

Новизна теории Эйнштейна заключается в доказательстве того, что такая позиция несостоятельна. Предполагая, что различные планеты вращаются с одинаковой скоростью, когда их оси находятся в относительном покое, каждый отдельный наблюдатель должен отныне ориентироваться на вращение своей собственной планеты, а не на вращение других планет, когда имеет место относительное движение. Только так можно сохранить специальный принцип относительности. В частности, если мы предположим, что одна вращающаяся планета перемещается к далекой звезде, а затем возвращается вблизи вращающейся Земли, как в примере с двумя близнецами, то окажется, что из-за взаимосвязи между оптическими часами и вращением планет странствующая планета за время своего путешествия совершила бы меньше оборотов, чем Земля. Таким образом, мы видим, что упомянутое нами замедление является абсолютно общим явлением и действительно должно быть таковым, если мы хотим сохранить специальный принцип относительности.

Кроме того, мы видим, что большая разница между классической наукой и теорией относительности заключается не в замене вращения Земли оптическими часами, поскольку оба этих определения времени были бы идентичны, а в доказательстве того, что вращение Земли или оптические часы Земли действительно только как мера времени для наблюдателя на Земле или для наблюдателя, находящегося в покое по отношению к нему.

Установив солидарность эволюции всех физических явлений, находящихся в покое в одной и той же галилеевой системе отсчета, как неизбежное следствие относительности галилеева движения, мы должны теперь спросить, следует ли предполагать, что эта общая солидарность распространяется на жизненные явления и на наше сознание лета времени. Конечно, мы не можем отрицать, что старение сопровождается физиологическими изменениями в нашем организме; следовательно, уже на этом основании не может быть сомнений в том, что физиологическое старение будет происходить в соответствии с общей солидарностью всех физических явлений. Но существует и другой аспект течения времени, а именно наше осознание его потока.

Наше осознание бегства времени, вероятно, является самым фундаментальным фактом сознания; и оно остается вечной загадкой. Если мы приписываем его определенным физиологическим процессам, происходящим в мозге, то оно, конечно, должно сопровождать общую эволюцию физических процессов; но если мы хотим рассматривать это бегство времени как жизненное или духовное явление, отличное по своей сути от всего физического, то не может быть никаких *априорных* оснований предполагать, что оно будет сопровождать общие физические процессы. Конечно, наше осознание бегства времени является чрезвычайно расплывчатым ощущением; тем не менее, пока мы сохраняем сознательное состояние, нам не составляет труда отличить продолжительность двенадцати часов от продолжительности одной секунды.

Если же в примере с двумя близнецами мы предположим, что продолжительность путешествия и скорость путешествующего близнеца были выбраны таким образом, что когда близнецы снова встречаются, часы путешественника показывают продвижение всего на одну секунду, а часы его неподвижного брата — продвижение на десять лет, то наше различие между физиологическим временем и нашим осознанием течения времени приведет к следующему результату: Путешествующий близнец не постарел бы с физиологической точки зрения, но в своем внутреннем сознании он полностью осознавал бы, что во время его путешествия прошло время, намного превышающее одну секунду. Однако мы не можем не заметить, что если бы это было так, если бы существовали два вида старения для одного и того же человека, один физиологический, а другой соответствующий психологическому восприятию течения времени, то специальный принцип относительности, а вместе с ним и теория Эйнштейна, должны были бы быть отвергнуты.

Причина этого последнего утверждения легко понятна: если бы два вида течения времени варьировались независимо друг от друга, скорость развития всех процессов, по-видимому, варьировалась бы в зависимости от системы отсчета, в которой мы могли бы находиться — черепаха, казалось бы, ползла бы или безумно мчалась по пространству. Таким образом, теоретически было бы возможно обнаружить разницу между галилеевыми системами отсчета и, следовательно, обнаружить абсолютную скорость движения через эфир или через пространство. А это противоречило бы принципу относительности.

Если сопоставить массу эмпирических данных, подтверждающих специальный принцип относительности, и полное отсутствие каких-либо доказательств, которые могли бы подкрепить убеждение, что воспринимаемое и проживаемое время отличается от времени физики и физиологического старения, то неудивительно, что математики, занимающиеся относительностью, совершенно не интересуются такими расплывчатыми гипотезами некоторых философов ().

Кроме того, есть еще один аспект этого вопроса. Основная причина всей упомянутой нами критики заключается в том, что в глубине души критик, несмотря ни на что, хочет сохранить свое наследственное убеждение в абсолютности времени. Даже будучи

убежденным, что в результате физических открытий Эйнштейна любая такая вера несовместима с эволюцией физических явлений, он стремится утверждать, что абсолютное время должно продолжать существовать, когда речь идет о восприятии течения времени и нашем сознании жизни. Таким образом, он проводит различие между реально прожитым временем и временем, измеряемым нашими оптическими часами. Но критик упускает из виду тот факт, что эта вера в абсолютное время, от которой он отказывается отказаться, ни в коей мере не является рациональной необходимостью, не более чем гипотеза о множественности времен. Только эксперимент может дать нам подсказку; и даже если физический эксперимент не способен пролить свет на духовное, тем не менее, если мы вечно будем оставаться невежественными в духовных вопросах, то, безусловно, нет никаких оснований *априори* утверждать, что они должны подчиняться абсолютному времени или что само время должно иметь какое-либо значение в отношении них. Таким образом, проблема критика, желающего понять значение открытий Эйнштейна, заключается в том, что, несмотря на себя, он остается одержим этой необоснованной верой в абсолютность времени. Эта убежденность, несомненно, трудно искоренима, и только длительная интроспекция может постепенно избавить нас от этой одержимости, которая так глубоко укоренилась в нашем виде. Тогда, и только тогда, так называемый парадокс двух близнецов перестанет быть парадоксом.

По всем этим причинам, если мы принимаем предпосылки Эйнштейна, нет иного выхода, как признать, что продолжительность, отмеченная оптическими часами в галилеевой системе, даст нам те же измерения продолжительности, что и любое другое изолированное периодическое физическое явление; и что наше старение, наше осознание течения времени и время, которое мы сознательно проживаем, сопровождают колебания оптических часов. Короче говоря, если оптические часы в нашей галилеевой системе показывают, что прошел один год, мы должны были постареть на один год. Мы должны были засыпать и просыпаться 365 раз, и у нас должно было быть достаточно времени, чтобы выполнить все те обязанности, которые обычно занимают один год.

В этих условиях к чему в конечном итоге сводится пример с двумя близнецами? Просто к следующему: отъезд нашего брата-близнеца и его возвращение на Землю составляют два определенных события. Поскольку теория относительности лишает продолжительность, разделяющую два события, какого-либо определенного значения, нет причин удивляться тому, что эта продолжительность проявляет разные величины для разных наблюдателей.

Давайте снова сформулируем парадокс в следующей альтернативной форме: наш брат-близнец преодолевает расстояние в тридцать два световых года (когда он летит к звезде и затем возвращается), и продолжительность его путешествия составляет сорок лет; следовательно, его скорость на этом расстоянии составляет четыре пятых от скорости света ($\frac{4}{5}$). Как же тогда он мог быть введен в заблуждение, полагая, что ему потребовалось всего двадцать лет, чтобы преодолеть это общее расстояние? Не подсказывало ли бы ему это убеждение, что его скорость была больше скорости света, и не противоречило бы ли это не только теории относительности, но и утверждению, которое он добровольно высказал, что его скорость по отношению к нам составляла только четыре пятых скорости света?

Но и здесь критика вызвана другой ошибочной идеей — идеей абсолютного расстояния. Критик не понимает, что расстояние от Земли до звезды, как и любое другое расстояние, является неопределенным и само по себе не имеет значения. Хотя для нас это расстояние составляет шестнадцать световых лет, по мнению путешественника оно составляет всего восемь световых лет; и его мнение выражает точно такую же меру реальности, как и наше. Мы можем только еще раз повторить, что абсолютная продолжительность и расстояние несовместимы с предпосылками Эйнштейна; и если мы будем настаивать на сохранении

наших классических навязчивых идей, изучение теории Эйнштейна будет мало чем отличаться от кошмара.

Давайте теперь рассмотрим совершенно другой вид критики. Например, утверждается, что принцип относительности позволяет нам интерпретировать любую проблему относительного движения между двумя телами двумя разными способами: рассматривая либо одно тело, либо другое как находящееся в покое. Тогда, по мнению критика, поскольку в задаче о двух близнецах именно движение одного из них является причиной замедления его времени, все, что нам нужно сделать, это считать его находящимся в покое, а его брата — в движении, чтобы прийти к нелепому выводу, что один из близнецов моложе своего брата.

Этот аргумент является радикально неверным по двум отдельным причинам. Во-первых, специальный принцип относительности *не утверждает*, что в общем случае, когда два тела находятся в относительном движении, мы можем считать любое из них находящимся в покое. Специальный принцип подчеркивает тот факт, что такая обратимость возможна *только тогда, когда движения обоих тел являются галилеевыми*.

В данном случае состояние близнеца, оставшегося на Земле, действительно является галилеевым (если мы пренебрежем вращением Земли и кривизной ее орбиты); но это галилеево условие больше не применимо к близнецу, который меняет направление своего движения, когда достигает звезды. В последнем случае имеет место ускорение, и появятся хорошо известные симптомы ускоренного движения, а именно силы инерции, которые вызовут четко определенные физические возмущения.

Фактически, мы можем изменить задачу о двух близнецах, чтобы исключить ускорение, предположив, что так называемый путешествующий близнец проходит мимо Земли и звезды, не останавливаясь и не меняя направления движения. В этом случае движения обоих близнецов являются галилеевыми; и, действительно, специальный принцип относительности позволяет нам считать одного из близнецов находящимся в покое, а другого — в движении. Но, опять же, мы должны видеть, что независимо от того, считаем ли мы одного из близнецов находящимся в покое, относительное старение происходит точно так же; следовательно, утверждение критиков о том, что движение вызывает замедление времени, является необоснованным (), если не дать более полного объяснения.

Мы можем прояснить эти моменты, рассмотрев слегка измененный пример, который мы предложили. Во-первых, предположим, что земной близнец, Земля и звезда находятся в покое, а так называемый путешествующий близнец без остановки пролетает мимо Земли и звезды. Далее предположим, что от Земли до звезды проходит стержень. Возвращаясь к числовым значениям, выбранным в начале главы, расчет покажет, что продолжительность перехода путешествующего близнеца от Земли до звезды составит двадцать лет по мнению наблюдателя на Земле и только десять лет по мнению путешественника. Почему такая разница?

Потому что, как мы уже упоминали, поскольку между так называемым путешественником и стержнем существует относительное движение, расстояние от Земли до звезды, или длина стержня, сокращается до половины своей длины, когда оно рассчитывается им. И здесь мы должны отметить, что это сокращение не связано с движением так называемого путешественника (поскольку движение, если оно не ускоряется, не имеет абсолютного значения). Оно обусловлено *относительным движением* между странником и палкой, или расстоянием между Землей и звездой. Следовательно, если бы странник считал себя находящимся в покое, а земной близнец вместе с Землей и звездой пролетал мимо него, то выводы остались бы точно такими же, поскольку в этом случае стержень, или расстояние между Землей и звездой, снова имел бы точно такую же

относительную скорость по отношению к так называемому страннику, а *учитывается именно относительная скорость, а не абсолютная*. Таким образом, мы видим, что никаких противоречий не возникает, независимо от того, считаем ли мы одного из близнецов находящимся в покое, а другого — движущимся.

Вернемся теперь к полной задаче, в которой странник возвращается на Землю. В этом случае странник прожил совершенно иную жизнь, чем его брат, поскольку *он*, и только *он*, подвергся ускорению.

Было бы неправомерно пытаться применить специальный принцип относительности и рассуждать так, как будто странник всегда находился в покое, поскольку, поступая так, мы должны были бы предположить, что он никогда не подвергался ускорению, и поэтому мы должны были бы приписать это ускорение его брату. Задача была бы полностью изменена, и относительное старение было бы обращено вспять. Но никакие аргументы против теории не могли бы быть приведены по той простой причине, что мы рассматривали бы совершенно другую задачу, в которой обстоятельства ускорения уже не были бы прежними.

Для полноты картины давайте предположим, что теперь путешественник остается в покое, а его земной двойник, Земля и звезда совершают движение вперед и назад, подвергаясь, конечно, при этом ускорению, когда их скорость меняется на противоположную. Сохраняя те же числовые значения, мы должны обнаружить, что бывший странник, как и прежде, ждал возвращения своего брата двадцать лет, но теперь этот земной брат пришел бы к выводу, что его отсутствие длилось десять лет, а не сорок. Таким образом, даже с чисто числовой точки зрения условия не были бы полностью обращены. Таким образом, в общем случае мы видим, что когда два наблюдателя расстаются, а затем снова встречаются, один из них (), если не оба, должен был подвергнуться ускорению; в противном случае они никогда не смогли бы встретиться снова, а блуждали бы все дальше и дальше друг от друга *до бесконечности*.⁽⁴⁷⁴⁾ Если мы рассмотрим близнецов, которые расстаются, а затем снова встречаются, то младший из них неизменно будет тем, кто подвергся ускорению.

Нам не следует удивляться этим вполне реальным эффектам, вызванным ускорением, поскольку мы должны помнить, что ускорение является абсолютным, а не относительным, как простая скорость. Тело имеет ту или иную скорость в зависимости от нашей точки зрения или выбора системы отсчета; но когда тело ускоряется, выбор нашей системы отсчета не имеет значения по той простой причине, что ускорение проявляется в виде физических сил и напряжений, которые могут оказывать ощутимое влияние.

Мы не должны дать себя ввести в заблуждение дальнейшим обобщением Эйнштейна, известным как **постулат эквивалентности**, согласно которому даже ускоренный наблюдатель может считаться находящимся в покое. Этот новый постулат в определенной степени изменяет положение проблемы двух близнецов. В то время как специальный принцип не позволял нам считать ускоренного странника находящимся в покое, постулат эквивалентности позволяет нам принять эту альтернативную точку зрения. Однако те, кто надеется таким образом обнаружить логическую несообразность в теории, снова будут разочарованы, поскольку постулат прямо гласит, что ускоренный наблюдатель может считаться находящимся в покое *только в том случае, если мы предположим, что поле гравитации заменяет поле инерционных сил*, которым подвергался ускоренный наблюдатель. Тогда, в силу самого постулата эквивалентности, произойдет точно такое же относительное омоложение, только теперь оно будет приписываться гравитации, а не ускорению.

Надеемся, что парадокс двух близнецов был представлен достаточное количество способов, чтобы позволить добросовестному студенту овладеть этой трудностью. Проблема требует определенного усилия самоанализа, но как только нам удастся избавиться от наших предвзятых представлений о пространстве и времени, парадокс исчезнет сам собой.

А теперь давайте упомянем другой тип так называемого парадокса, который, по-видимому, доставляет значительные трудности начинающим. Мы имеем в виду эйнштейновское сложение скоростей. Итак, критик начинает с того, что, согласно диктату здравого смысла $1 + 1 = 2$, вполне естественно предположить, что скорость в одну милю в секунду плюс другая скорость в одну милю в секунду равна скорости в две мили в секунду. Утверждение Эйнштейна о том, что результирующая скорость немного меньше двух миль в секунду, поэтому на первый взгляд кажется абсурдным. Но если мы внимательно рассмотрим эти аргументы, то увидим, что они снова основаны на неверном понимании проблемы.

Даже в классической науке не всегда верно утверждать, что скорости складываются как числа в арифметике. Рассмотрим, например, следующую иллюстрацию: если, стоя на набережной, мы видим, как поезд удаляется от нас со скоростью v , и если из поезда выстреливается пуля со скоростью V , то не всегда правильно утверждать, что скорость пули относительно нас, находящихся на набережной, равна $v + V$. Это утверждение верно *только в том случае, если* скорости поезда и пули лежат на одной прямой линии. Если мы не укажем это ограничение, наше утверждение будет неверным. В теории Эйнштейна проблема очень похожа.

Если галилеева система отсчета удаляется от нас со скоростью v и если *по отношению к этой системе отсчета* и в направлении ее движения пуля летит со скоростью V , то результирующая скорость пули может быть $v + V$ только при условии, что наши методы измерения скорости и методы наблюдателя в галилеевой системе отсчета идентичны, то есть при условии, что наши измерения пространства и времени идентичны. Классическая наука всегда молчаливо предполагала, что это так; но мы знаем, что в теории Эйнштейна идентичность наших стандартов измерения больше не сохраняется, поскольку такое положение дел было бы несовместимо с неизменностью скорости света.

Поэтому мы можем сопоставить условия, в которых производятся различные измерения пространства и времени в теории Эйнштейна, с условиями, которые сохранялись бы в классической науке, если бы в силу какого-то закона природы наблюдатель в поезде не мог выстрелить пулей точно в направлении движения поезда. Другими словами, в теории Эйнштейна скорости, лежащие в одном направлении, складываются как алгебраические числа, при условии, что скорости, которые мы предлагаем сложить и вычесть, вычисляются при точно таких же условиях, то есть *одним и тем же галилеевым наблюдателем*. Когда один наблюдатель вычисляет одну скорость, а второй наблюдатель, находящийся в относительном движении, вычисляет вторую скорость, классический закон сложения не работает.

Очень похожа на эту проблему сложения скоростей проблема одновременности. Таким образом, теория Эйнштейна подразумевает, что если два события A и B происходят одновременно для одного наблюдателя, Джона, и если, по мнению другого наблюдателя, Питера, движущегося относительно Джона, событие B и другое событие C происходят одновременно, то неверно предполагать, что A и C будут одновременными по мнению любого из двух наблюдателей. Здесь критик без дальнейших размышлений предполагает, что символическое выражение этих отношений будет следующим: $A = B ; B = C ; C \neq A$. Из этого он делает вывод, что теория относительности противоречит логике и является

явным абсурдом. И все же, если мы внимательно рассмотрим эти утверждения, то без труда увидим, что ошибка в логическом рассуждении лежит не на Эйнштейне, а на самом критике.

Чтобы развеять любые сомнения по этому поводу, давайте спросим критика, что он хочет сказать символом $=$. Допустим, например, что мы рассматриваем два объекта, A и B , одинакового размера. Имеем ли мы право написать $A = B$? Ответ должен быть: да, если символ $=$ означает «имеет одинаковый размер»; или нет, если он означает большинство других типов тождества. Чтобы избежать путаницы, давайте обозначим символ $\overset{S}{=}$ (S означает размер) и напомним $A \overset{S}{=} B$.

А теперь рассмотрим третий объект, C . Мы будем предполагать, что C имеет тот же цвет, что и B . Более того мы ничего о нем не знаем. И снова, имеем ли мы право написать $B = C$? Ответ: да, если символ $=$ означает «имеет тот же цвет, что и»; нет, если он означает какой-либо другой тип равенства. Чтобы избежать путаницы, давайте запишем наш символ: $\overset{C}{=}$ (где C означает цвет).

Теперь наши два равенства становятся $A \overset{S}{=} B ; B \overset{C}{=} C$; и, очевидно, у нас нет оснований предполагать, что A должно быть равным C ни по размеру, ни по цвету, поскольку символы $\overset{S}{=}$ и $\overset{C}{=}$ не передают одно и то же значение.

Можно предположить, что даже самый небрежный критик согласился бы с правильностью предыдущего аргумента. Но в случае его критики теории Эйнштейна он бы возразил: «Все это очень хорошо, но в отношении релятивистской абсурдности, на которую я вам указываю, я вполне вправе написать $A = B ; B = C$ и $C \neq A$. Ведь в данном случае символ $=$ между A и B , а также между B и C , обозначает точно одно и то же понятие, а именно идентичность во времени; он не относится к таким разным понятиям, как «размер» в первом случае и «цвет» во втором».

Очевидно, что в этом аргументе легко обнаружить бессознательно введенную *petitio principii*. Заявляя, что два символа $=$ должны означать одно и то же, поскольку оба они обозначают идентичность во времени, критик *априори* принимает как само собой разумеющееся, что может быть только один поток времени, или, другими словами, что время является абсолютным. Конечно, если он желает ввести свои собственные частные предположения, он может это сделать; но он не должен винить теорию, если в результате этого он сталкивается с логическим противоречием. Он должен понимать, что противоречие возникает исключительно в результате его собственного первоначального необоснованного предположения, и что, если бы он отказался от этого первоначального предположения, противоречие автоматически исчезло бы. Тогда он действительно должен был бы признать, что два символа $=$ не обязательно имеют одинаковое значение; что первый, который мы можем записать как $\overset{J}{=}$, будет означать «в то же время по Иоанну», а второй, $\overset{P}{=}$, будет означать «в то же время по Петру». В результате отношения будут записаны следующим образом:

$$A \overset{J}{=} B; B \overset{P}{=} C; A \neq C;$$

и, как и в случае с цветом и размером, он признал бы, что первые два равенства никоим образом не обуславливают равенство A и C .

Но мы можем задаться вопросом, почему критик не осознает, что все возникшие проблемы являются результатом его собственных действий. Ответ кажется совершенно ясным. Он будет примерно таким:

«Он ни в коем случае не осознает, что ввел произвольное предположение и тем самым упустил весь вопрос. Традиционная вера в абсолютное время настолько доминирует в его сознании, что он думает в терминах этого понятия, даже когда знает, что теория относительности не основана на каком-либо таком *априорном* убеждении».

Еще раз: теория относительности как теория математической физики может выжить или погибнуть. Ответ даст эксперимент. Если предсказания теории не будут соответствовать эксперименту, если, например, недавний эксперимент Миллера будет признан окончательным *доказательством скорости движения через эфир*, то теорию будет невозможно спасти, по крайней мере в ее нынешнем виде.^[75] Но мы не должны путать способность теории описывать работу природы с ее легитимностью как совершенно последовательной и рациональной доктрины мышления. По этому последнему пункту нет никаких сомнений. Теория была тщательно изучена величайшими из ныне живущих математиков, и в ней не было обнаружено ни малейшей ошибки математического рассуждения, а значит, и логики.

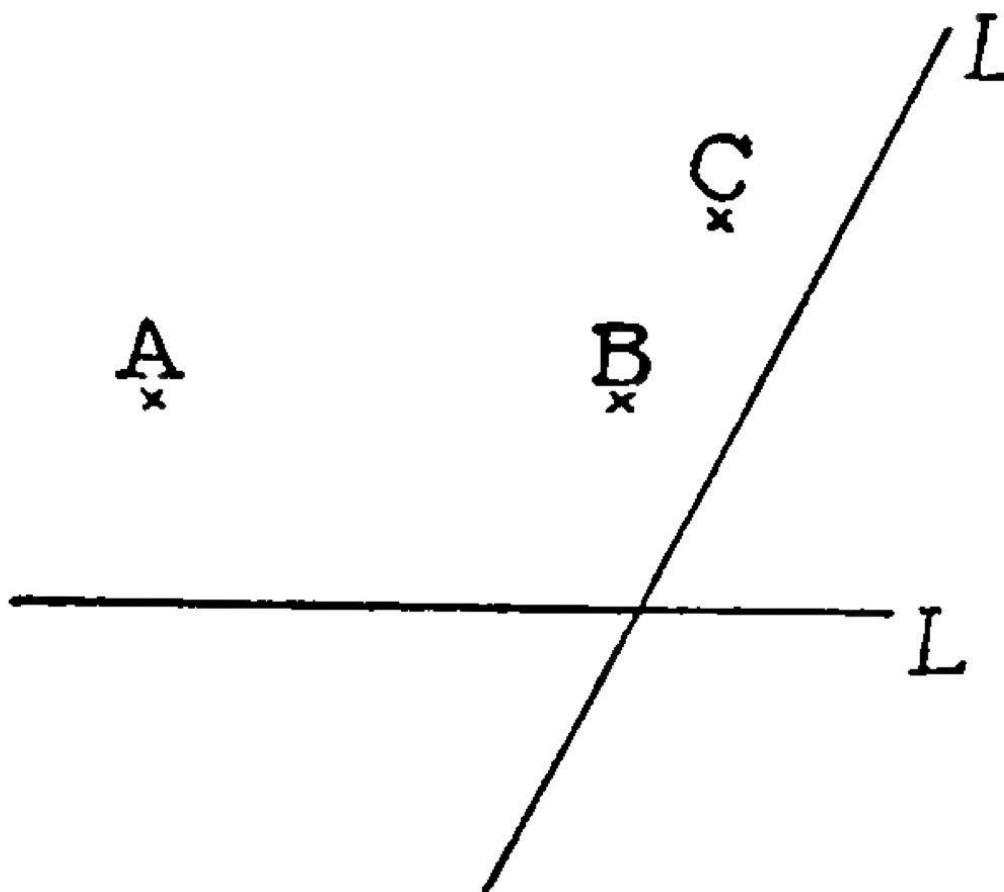


Рис. VIa

В качестве заключительной иллюстрации той же проблемы относительности одновременности мы можем привести геометрическую аналогию. Нам нужно только рассмотреть две точки A и B , расположенные на одинаковом расстоянии над линией L , а затем рассмотреть точки B и C , расположенные на одинаковом расстоянии над другой линией L' . Достаточно взглянуть на рисунок, чтобы понять, что точки A и C находятся на одинаковом расстоянии ни от L , ни от L' . Только в том случае, если бы две линии L и L' совпадали, они были бы на одинаковом расстоянии.

То же самое происходит в теории относительности. Прямые линии L и L' соответствуют направлениям времени двух разных наблюдателей. Классическая наука, предполагая, что время является абсолютным, считала эти две линии совпадающими. Теория относительности доказала ошибочность этого убеждения.

ЧАСТЬ III
ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ГЛАВА XXIII

ПОТЕНЦИАЛЫ И СИЛЫ

Согласно классической науке, сила может быть определена как произведение массы на ускорение. Когда сила не действует, движение тела всегда является галилеевым; только когда сила действует, движение тела ускоряется.^[76]

Следует отметить, что когда на тело действует определенное мышечное усилие, величина этого усилия или силы зависит исключительно от мышечного напряжения, которое мы готовы или способны произвести. С другой стороны, когда тело находится в поле земной гравитации, гравитационная сила, действующая на него и обычно известная как вес тела, зависит не только от массы Земли, но и от массы тела. Чтобы устранить эту неопределенность, обычно указывают, что тело, на которое действует сила, имеет единичную массу; такое тело называется испытательным телом. В этих условиях мы можем исследовать поле силы, помещая наше тестовое тело в последовательные области пространства и определяя величину и направление силы, действующей на тело. Когда мы определили величину и направление силы для каждой точки пространства, мы можем утверждать, что определили расположение **поля силы**.

В физике мы часто имеем дело с силовыми полями. Гравитационное поле, окружающее Землю, является лишь одним из конкретных примеров. Мы также можем рассмотреть электрическое поле, окружающее электрон, или магнитное поле, окружающее полюса магнита, или даже комбинации этих двух полей, такие как электромагнитные поля, создаваемые электрическими токами.

Когда направление и величина силы одинаковы во всем пространстве и не изменяются со временем, поле силы называется **однородным**. Однородные поля силы очень трудно получить; простейшим примером, который мы можем привести, будет река, текущая с постоянной скоростью по прямолинейному руслу. Сила, оказываемая течением, конечно, останется одинаковой по величине и направлению во всех точках реки; по этой причине поле силы, создаваемое течением, будет представлять собой однородное поле.

Теперь, если мы удовлетворимся таким описанием поля силы, то увидим, что в случае однородного поля, во всяком случае, нет возможности отличить участок реки или поля, расположенный выше по течению, от участка, расположенного ниже по течению. Все части реки идентичны. Но очевидно, что эта кажущаяся идентичность между разными частями реки очень поверхностна. Общеизвестно, что лодка сама по себе плывет вниз по течению, но для того, чтобы заставить ее плыть вверх по течению, требуется затратить значительное количество энергии. Поэтому математики были вынуждены принять во внимание новый тип абстракции, называемый **потенциалом**. Благодаря введению этого нового понятия стало возможным различать различные участки реки (вверх по течению или вниз по течению), утверждая, что эти участки различаются по потенциалу. Участки вверх по течению были названы участками с более высоким потенциалом, а участки вниз по течению — участками с более низким потенциалом. Таким образом, можно было сформулировать в виде общего закона, что тела, оставленные сами по себе, будут самостоятельно перемещаться из участков с более высоким потенциалом в участки с более низким потенциалом.^[77]

До сих пор мы имели дело с общими понятиями, и остается выяснить, каким образом силы и потенциалы будут связаны между собой. Математическая связь выражается следующим образом:

Потенциалы определены таким образом, что выражение проекции силы в любом заданном направлении в любой конкретной точке поля дается изменением величины потенциала при переходе от этой точки к соседней точке в том же направлении. Так же как ускорение, проецируемое вдоль заданного направления, является временной скоростью изменения скорости, проецируемой вдоль того же направления, так и сила является пространственной скоростью изменения потенциала; и так же как ускорение направлено к увеличению скорости, так и сила направлена к более низким потенциалам.

Существование этих потенциалов в общем случае применимо ко всем силовым полям, независимо от того, являются ли эти поля однородными или неоднородными.^[78] Как мы уже сказали, именно изменения значений этих потенциалов от точки к точке связаны с существованием сил. Когда это изменение однородно в одном направлении и не существует изменений в направлениях под прямым углом, мы имеем дело с однородным силовым полем. Когда изменение неравномерно, мы имеем неравномерное поле силы. Когда потенциал имеет одинаковое постоянное значение во всем пространстве, так что его значение не изменяется от места к месту, силы не могут присутствовать; в этом случае нет поля силы.

Из этого мы видим, что определенная степень неопределенности окружает точное числовое значение потенциала, поскольку только его изменение от места к месту, а не его абсолютное значение, определяет силу. Эта неопределенность может быть устранена в случае неоднородного поля силы, если оговорить, что в тех областях поля, где сила исчезает (как, например, в случае гравитационной силы на бесконечном расстоянии от материи), сам потенциал исчезает. Присвоив потенциалу определенное значение в одной части поля, мы можем определить его точное значение в разных точках во всех других частях поля.

Давайте теперь приведем несколько конкретных примеров полей силы и потенциалов в классической науке. Мы уже упоминали поле силы, окружающее материю. Это было гравитационное или ньютоновское поле, а потенциал в каждой точке, полученный из него, назывался **ньютоновским потенциалом** в этой точке. Распределение силового поля было известно совершенно точно, когда было известно распределение потенциала. Фактически закон Ньютона, который говорит нам, как силовое поле распределяется вокруг материи, может быть также выражен в эквивалентной форме **уравнением Лапласа**, в котором описывается распределение потенциала, а не распределение силы.

Рассмотрим теперь другой тип поля силы, известный как инерционное поле. В абсолютно свободном пространстве, вдали от материи, поле силы не существует, если мы относим наши наблюдения к галилеевой системе отсчета. Но если мы теперь перейдем в ускоренную или вращающуюся систему отсчета, то ощутим воздействие поля силы, которое мы будем приписывать силам инерции. Этим силам будут подвержены не только наши тела, но и все свободные тела. Рассмотрим вращающийся диск и шарик, катящийся без трения по поверхности диска. Если шарик отправить из центра диска к его краю, он, конечно, будет двигаться по прямой линии с постоянной скоростью относительно Земли или любой другой галилеевой системы отсчета. Но тогда, по отношению к самому вращающемуся диску, его траектория больше не может быть прямолинейной и равномерной. Вместо того, чтобы двигаться по одному из радиусов вращающегося диска, он будет двигаться по кривой, как будто его тянет вбок какая-то сила.

Этот результат является общим. Если бы *мы сами* попытались продвинуться по одному из радиусов вращающегося диска, мы бы ощутили реальную физическую силу, тянущую нас вбок. По сути, когда мы относим события к вращающемуся диску, а не к невращающейся Земле (вращение Земли настолько медленное, что мы можем пренебречь им в первом приближении), необходимо учитывать физическое существование силового поля. Точный тип силы, о котором мы упомянули, называется **силой Кориолиса**; кроме того, существует еще один тип силы, более известный как **центробежная сила**. Оба эти типа сил называются силами инерции. Их совокупность и составляет поле инерционной силы, существующее в вращающейся системе отсчета.

Если бы вместо вращающейся системы отсчета мы рассмотрели ускоряющийся железнодорожный вагон, поле инерционной силы было бы расположено по-другому. В случае поезда, движущегося с постоянным ускорением по прямой линии, поле инерционной силы было бы равномерным и располагалось бы в продольном направлении по поезду.

Все эти различные иллюстрации показывают нам, что в то время как в галилеевой системе отсчета поле силы не существует, оно возникает автоматически, как только мы помещаем себя в любую ускоренную систему отсчета. Именно по этой причине ускоренные системы отсчета можно физически отличить от галилеевых систем отсчета; и именно благодаря образованию физических полей силы ускоренное движение следует рассматривать как абсолютное, тогда как скорость, не порождающая таких полей, не дает нам возможности отличить одну скорость от другой, а значит, является относительной.

Теперь мы видели, что поля силы сопровождаются распределениями потенциала. Отсюда следует, что в то время как в отношении галилеевой системы инерционный потенциал равен нулю в каждой точке или, по крайней мере, сохраняет некоторое постоянное значение, в случае ускоренных систем этот инерционный потенциал должен варьироваться от места к месту в системе. Величина силы в любой точке ускоренной системы координат, таким образом, задается математическим выражением, включающим изменения значения потенциала в окрестности рассматриваемой точки.

Все, что мы объяснили до сих пор, относится к классической науке, но нам показалось необходимым кратко упомянуть эти результаты, прежде чем перейти к более систематическому изучению теории Эйнштейна. Теперь мы увидим, как все эти результаты находят свое естественное место в теории пространства-времени.

Рассмотрим галилееву систему отсчета и объект, свободно движущийся в этой системе. Его траектория, конечно, будет прямолинейной, а скорость — постоянной, поэтому он не будет иметь ускорения в соответствии с законом инерции Ньютона. Если мы интерпретируем эти результаты с точки зрения пространства-времени, то видим, что мировая линия тела является прямой линией в пространстве-времени, относящейся к нашей системе сетки из равных четырехмерных кубов. Если мы теперь рассмотрим движение этого же свободного тела из некоторой определенной ускоренной системы отсчета, то все, что нам нужно сделать, это соответствующим образом изменить нашу четырехмерную систему сетки пространства-времени. Это изменение системы сеток не влияет на мировую линию тела, поскольку эта линия остается прямой линией или геодезической линией в плоском пространстве-времени; но, с другой стороны, оно, безусловно, изменит вид прямой линии, когда мы соотнесем наши измерения с нашей криволинейной системой сеток. Прежняя прямая мировая линия теперь будет выглядеть изогнутой определенным образом, и ее точное математическое уравнение, относящееся к нашей новой криволинейной системе координат, может быть получено без труда.

Физическое значение этой кажущейся кривизны мировой линии тела будет заключаться в том, что тело теперь будет казаться ускоряющимся по отношению к нашей новой негалилеевой системе отсчета. Точная величина этого ускорения будет, следовательно, задаваться видимой кривизной мировой линии, по которой движется тело, и эта кривизна, конечно, неявно выражается уравнением мировой линии при отнесении к нашей криволинейной сетке. Но для данного испытуемого тела ускорение связано с силой, действующей на тело. Отсюда следует, что математическое выражение силы может быть получено немедленно.

Это математическое выражение кривой мировой линии, а значит, и силы инерции в любой конкретной точке, складывается из изменений значения g_{ik} вокруг этой точки. Если бы потенциалы инерции (g_{ik}) оставались постоянными по всему пространству, как это было бы в галилеевой системе отсчета, это математическое выражение исчезло бы в значении (). Отсюда следует, что потенциалы инерции (g_{ik}), из которых состоит это выражение силы, должны соответствовать потенциалам инерции. Таким образом, мы обнаружили физическое значение потенциалов инерции (g_{ik}) пространства-времени: они определяют потенциалы.

Мы видим, что эта идентификация является правомерной во всех отношениях. Так, в галилеевой системе отсчета нет сил инерции, поэтому потенциалы инерции должны быть постоянными; и мы знаем, что в системе равномерных четырехмерных кубов, которая соответствует галилеевой системе, g_{ik} являются постоянными и задаются $g_{11} = g_{22} = g_{33} = +1; g_{44} = -1$, а все остальные g_{ik} равны нулю. g_{ik} Опять же, в ускоренной системе отсчета появляется поле инерционных сил; следовательно, потенциал должен варьироваться от места к месту; и мы знаем, что в криволинейной системе сеток (соответствующей ускоренной системе отсчета) потенциалы инерции теряют свои постоянные значения и варьируются от места к месту.

До сих пор причина существования сил инерции была очевидна. Они возникают из-за неравномерного распределения чисел g_{ik} , которое сопровождает все криволинейные системы координат (ускоренные системы отсчета).⁽¹⁷⁹⁾ Когда это происходит, математическое выражение силы инерции принимает определенное числовое значение в каждой точке, тогда как, когда g_{ik} являются константами, как в декартовой системе координат, это выражение силы сохраняет нулевое значение.

Из этого мы видим, что силы инерции возникают из-за нашей попытки разделить пространство-время криволинейными сетками вместо декартовых, так же как они возникают из-за нашей замены галилеевых систем ускоренных систем. Однако мы не можем не чувствовать, что, дойдя до этого момента, необходимо дальнейшее обобщение. Чтобы быть более ясным, следует понимать, что разработанная нами схема физики заставила нас придать фундаментальную роль пространству-времени. Но великий закон всемирного тяготения Ньютона выражен в терминах отдельного пространства и времени классической науки. Если пространство-время действительно так фундаментально, как заставил нас поверить Эйнштейн, то кажется невероятным, что закон Ньютона остается вне его сферы действия. Однако это действительно так, потому что если бы закон Ньютона был законом пространства-времени, он сохранил бы ту же форму, несмотря на любые изменения в нашей системе пространственно-временных сеток. А этого не происходит.

Следующей попыткой Эйнштейна было поэтому встроить закон Ньютона в общую структуру, и он достиг этого результата примерно в 1914 году. Математическое обобщение, которое позволило бы получить этот результат, сегодня кажется почти очевидным, поскольку (как будет объяснено в [главе XXV](#)) оно сводится к предположению, что вблизи

материи четырехмерное пространство-время теряет свою плоскость и становится неевклидовым или искривленным. Однако, по-видимому, именно физические наблюдения привели Эйнштейна к его великольному обобщению, поэтому мы будем следовать историческому порядку и объясним значение его постулата эквивалентности.

ГЛАВА XXIV

ПОСТУЛАТ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Постулат эквивалентности Эйнштейна заключается, по сути, в отождествлении сил гравитации и сил инерции. Он считал такое отождествление допустимым в силу некоторых хорошо известных эмпирических фактов, которые мы обсудим ниже.

Сначала напомним, что поле силы иллюстрируется областью пространства, в каждой точке которой на испытательный объект, с помощью которого можно исследовать поле, действует определенная сила. Классическая наука знала несколько различных типов полей. Электрические поля действовали на заряженные тела, магнитные поля действовали на магниты, а инерционные и гравитационные поля действовали на материальные тела в целом, независимо от того, были ли они заряжены или нет. На данный момент мы будем рассматривать исключительно инерционные и гравитационные поля.

Эти два вида силовых полей рассматривались классической наукой как совершенно разные по своей природе. Казалось, что для такого различия были очень веские причины. Предположим, например, что поезд замедляется. Если мы стоим в поезде, мы почувствуем силу, тянущую нас к локомотиву, и нам, возможно, потребуется приложить определенные усилия, чтобы противостоять этой тяге. Как таковая, эта сила, очевидно, реальна, поскольку мы ее ощущаем. Но предположим теперь, что наблюдатель на набережной видит те же самые события. Он будет рассуждать следующим образом: никакая сила не тянет пассажира, но поскольку поезд замедляется, а тело пассажира стремится сохранять постоянную скорость по прямой линии в соответствии с законами движения (*законом инерции*), в результате он обогнет локомотив, если не будет держаться за сиденье. Таким образом, мы видим, что в зависимости от того, оцениваем ли мы те же самые события с точки зрения поезда или насыпи, сила существует или становится вымыслом.

Аналогичные выводы можно сделать, если рассмотреть другие виды инерционных сил, называемые центробежной и кориолисовой силами. С точки зрения наблюдателя, который выбирает вращающуюся платформу в качестве системы отсчета (так же, как до Коперника люди привыкли брать Землю в качестве системы отсчета), центробежная и кориолисова силы являются реальными. Но в тот момент, когда мы относим события к галилеевой системе отсчета, эти силы становятся фиктивными и могут быть интерпретированы с точки зрения закона инерции, точно так же, как сила в поезде стала фиктивной, когда события рассматривались с насыпи.

Сравните эту ситуацию с ситуацией, когда камень падает на землю. Здесь мы можем отнести события к любой системе отсчета, но в любом случае закон инерции никогда не сможет объяснить движение камня к земле. Ситуация кажется совершенно иной, чем в случае с пассажиром в поезде. Итак, из этого следует, что мы вынуждены представить себе реальную силу, *силу притяжения*, тянущую камень к центру Земли. Таким образом, кажется, что сила тяжести, в отличие от силы инерции, не может быть объяснена лишь условиями наблюдения. Поэтому классическая наука предполагала, что вокруг тела, подобного Земле, существует реальная абсолютная сила, распределенная радиально в пространстве, в то время как в ускоренной камере силы были лишь фиктивными или относительными.

Есть еще один способ выявить разницу между силами инерции и силами гравитации. Силы инерции порождаются движением, тогда как силы гравитации порождаются

материей. Таким образом, если мы остановим вращение диска, наблюдатель, прикрепленный к диску, заметит, что силы инерции исчезли. Но чтобы устранить силу тяжести, необходимо уничтожить всю массу Земли, а это будет операция совершенно иного характера.

Теперь, в каждом типе силового поля величина притяжения, которое оказывается на тело, подверженное влиянию поля, определяется определенной характеристикой тела. Таким образом, в данном электрическом поле величина притяжения, оказываемого на тело в данной точке поля, пропорциональна электрическому заряду тела. Аналогично, в инерционном поле величина притяжения пропорциональна так называемой **инерционной массе** тела, а в гравитационном поле притяжение пропорционально **гравитационной массе** тела. Поэтому предполагалось, что каждое материальное тело обладает двумя типами масс, инерционной и гравитационной, соответствующими двум типам полей, на которые тело будет реагировать.

Конкретную иллюстрацию разницы между инерционной и гравитационной массой дает следующий пример: представьте себе бильярдный шар, лежащий на столе. Мы должны обнаружить, что чем больше масса шара, тем большее усилие потребуется, чтобы привести его в движение, а также остановить его движение после начала. Тип массы, который нас здесь интересует, — это инерционная масса; и мы можем сказать, что именно инерционная масса противодействует отклонению от прямолинейного равномерного движения или покоя, а значит, противодействует ускорению. Если же мы поднимем шар со стола и будем держать его на вытянутой руке, то усилие, которое нам придется приложить, чтобы не дать руке и шару упасть, снова будет зависеть от массы шара. Однако на этот раз масса, воздействию которой мы пытались бы противостоять, была бы гравитационной массой, т. е. массой, ответственной за вес. Именно эта гравитационная масса входит в выражение закона притяжения Ньютона.

Нет никаких *априорных* причин, по которым между этими двумя разными типами масс должна существовать какая-либо связь. Таким образом, если бильярдный шар весит в два раза больше другого, нет никакой логической необходимости предполагать, что его инерционная масса также будет в два раза больше, чем у другого. Однако самые точные физические эксперименты неизменно доказывают строгую пропорциональность между этими двумя типами масс, так что, выбирая подходящие единицы измерения, всегда можно было представить как инерционную, так и гравитационную массу данного тела одним и тем же числом. Классическая наука приняла равенство этих двух типов масс как эмпирический факт, но оказалась неспособной предложить какое-либо теоретическое обоснование для него. Казалось, что это было результатом какого-то чудесного совпадения.

Это равенство в числовых значениях двух типов масс будет иметь важные последствия. Допустим, что равенство не сохраняется. Это означало бы, что два бильярдных шара могут иметь одинаковую гравитационную массу, но различаться по значению своих инерционных масс. Если бы тогда два шара были одновременно отпущены и падали с одинаковой высоты к земле, то, поскольку их гравитационные массы равны, оба шара подвергались бы одинаковому притяжению земли. Но поскольку их инерционные массы, как предполагается, неравны, шар с большей инерционной массой будет сопротивляться ускорению падения сильнее, чем шар с меньшей инерционной массой. В результате шары не достигнут поверхности земли одновременно. С другой стороны, если два типа масс идентичны, мы можем быть уверены, что любые два объекта, отпущенные из одной и той же точки, достигнут поверхности земли в один и тот же момент (при условии, что мы действуем в

вакууме, чтобы сопротивление воздуха не мешало их падению). Именно потому, что эксперимент продемонстрировал одинаковую скорость падения всех тел, отпущенных с одинаковой высоты, Галилей пришел к выводу о равенстве двух масс. Однако следует отметить, что сверхточные эксперименты по методу Этвеша () (в частности, с использованием торсионных весов Этвеша) с тех пор подтвердили эти результаты с чрезвычайной точностью.^[80]

Таким образом, мы видим, что равенство двух типов масс позволяет нам предположить, что наблюдатель, находящийся в падающем лифте, не будет иметь веса. Он может стоять на весах, но стрелка всегда будет показывать ноль. Дело в том, что и наблюдатель, и весы будут падать с одинаковой скоростью к земле, поэтому ноги наблюдателя никогда не будут давить на весы.

Эти предположения могут показаться самоочевидными, но важно отметить, что они ни в коем случае не являются самоочевидными, пока мы не признаем полное равенство двух типов масс. Если бы такого равенства не существовало, наблюдатель в лифте все еще мог бы давить на весы или удариться о потолок лифта, и тогда было бы неправильно предполагать, что лифт, весы и наблюдатель будут падать с одинаковой скоростью и ускорением.

Мы можем проиллюстрировать пример падающего лифта в более общем плане, рассмотрев наблюдателя, находящегося внутри полого снаряда, описывающего параболу под действием притяжения Земли. Наблюдатель не обнаружил бы никаких проявлений веса в своем помещении. Он мог бы опрокинуть стакан, наполненный водой: вода не пролилась бы. Если бы он бросил в воздух горсть камешков, каждый камешек следовал бы по прямой траектории с прямолинейным движением через снаряд, как и в случае с галилеевой системой отсчета. Короче говоря, ни один механический эксперимент не сможет обнаружить наличие поля земного притяжения внутри любой системы отсчета, свободно движущейся под действием этого поля притяжения. Эксперименты, проводимые внутри таких падающих тел, очень трудно выполнить, но поскольку упомянутые нами результаты являются непосредственным следствием равенства двух типов масс, которое было установлено в ходе высокоточных экспериментов, мы можем косвенно предсказать результаты таких экспериментов.

До сих пор мы рассматривали аннулирование гравитационного поля, но мы также можем рассмотреть создание силового поля в пустом пространстве, удаленном от материи. Таким образом, если полый ящик подвергается переменному ускорению в пустом пространстве, наблюдатель, находящийся внутри ящика, будет испытывать переменное силовое поле (инерционную силу). Если теперь мы рассмотрим второй ящик, находящийся в покое в переменном гравитационном поле, распределенном по ящику точно так же, как силы инерции, и с той же интенсивностью, то равенство двух масс доказывает, что механические эксперименты, проводимые в любом из двух ящиков, дадут точно такие же результаты, и, следовательно, тела будут падать к полу ящика точно так же. Таким образом, *на основе механических экспериментов*, проводимых внутри камеры, невозможно определить, находимся ли мы в поле инерционной силы, создаваемой ускорением, или в поле гравитационной силы, создаваемой материей. Таковы выводы, к которым нас подталкивает равенство двух масс. Поскольку равенство двух типов масс является фактом, установленным экспериментом, мы также можем считать эмпирически установленным тот факт, что механические эксперименты не позволяют различить поле инерции и поле гравитации.^[81]

До этого момента все упомянутые факты были хорошо известны классической науке. Исключительно в интерпретации этих фактов Эйнштейн предлагает весьма оригинальные

взгляды. Давайте сначала рассмотрим, что говорила классическая наука. Ее аргументы были примерно следующими: наша неспособность различить поле инерционных сил, создаваемых ускорением, и поле гравитационных сил, создаваемых материей, обусловлена исключительно чудесным совпадением, а именно равенством двух масс. Опять же, когда в лифте, падающем в поле земной гравитации, мы не ощущаем веса, это не потому, что поле гравитации исчезло, а исключительно потому, что поле гравитации уравнивается равным и противоположным полем инерции, создаваемым ускоренным движением лифта. Равенство интенсивностей этих двух противоположных полей снова обусловлено равенством двух масс. Таким образом, согласно классической науке, между двумя типами силовых полей существовала очень четкая разница, и всегда предполагалось, что эта разница будет обнаружена при проведении немеханических экспериментов, таких как оптические или электромагнитные.

Именно эту классическую интерпретацию оспаривает Эйнштейн. Он утверждает, что поле силы, создаваемое в замкнутом пространстве, имеет точно такую же природу, независимо от того, было ли оно создано ускорением или гравитацией. Кроме того, в случае падающего лифта мы не должны говорить, что поле гравитации было нейтрализовано; мы должны сказать, что оно исчезло. При такой интерпретации чудесное равенство двух типов масс вовсе не является чудом. Не существует двух типов масс, которые реагируют на два типа сил. Поскольку существует только один тип силы, существует только один тип массы, которому классическая наука ошибочно дала два разных названия, а затем удивилась тому факту, что независимо от названия, его значение оставалось неизменным. Таким образом, Эйнштейну удалось объяснить чудесное равенство, которое озадачивало классическую науку.

Но, конечно, идея Эйнштейна поддавалась экспериментальному подтверждению или опровержению. Ведь если мы предполагаем, что два типа силовых полей являются одним целым, мы должны предположить, что не только механические эксперименты, но и *все виды экспериментов* не смогут обнаружить ни малейшей разницы. Такова действительно позиция Эйнштейна, и он отстаивает ее в **постулате эквивалентности**.

Этот постулат гласит, что не может быть никакой разницы в условиях, преобладающих внутри закрытого пространства, независимо от того, создается ли испытываемое силовое поле ускорением или гравитацией.

Теперь, когда все сказано и сделано, может показаться, что, выдвигая свой постулат эквивалентности, Эйнштейн сделал шаг в неизвестность. Равенство двух масс доказало, что, с точки зрения механических экспериментов, условия, существующие в падающем лифте, будут идентичны условиям, существующим в замкнутом пространстве, плавающем в свободном пространстве вдали от материи. Эти предположения были основаны на опыте. Но какое оправдание было для обобщения этих результатов и их беспрекословного распространения на все виды немеханических экспериментов? На первый взгляд обобщение может показаться несколько поспешным, и, безусловно, такие обобщения не должны поощряться людьми, не обладающими глубокими научными знаниями. Но в случае с Эйнштейном все обстоит иначе. В этом случае, как и во многих других, его обобщения принадлежат человеку, который, кажется, способен прочесть секреты природы, как никто другой до него. Восхищение вызывает не его знание математики или физики, а его потрясающее понимание философии природы. Фактически, подобное обобщение с его стороны встречалось и в специальной теории. Там он обобщил электродинамику в механике, здесь же все наоборот. Но в обоих случаях его движущей силой, по-видимому, было стремление найти единство в природе.

Существует отличная аналогия между интерпретацией Эйнштейном обсуждаемой нами проблемы и его объяснением эксперимента Майкельсона. В последнем случае мы помним, что движение по Галилееву через эфир, по-видимому, не вызывало дрейфа эфира. Лоренц объяснил отсутствие дрейфа эфира предположением, что физический дрейф действительно имел место, но был автоматически компенсирован чудесным образом благодаря хитрости природы, действующей через компенсирующее влияние реального физического сжатия тел, движущихся через эфир, и реального физического замедления продолжительности событий. Эйнштейн, как мы видели, предпочел предположить, что если дрейф эфира не мог быть обнаружен, то это потому, что дрейфа эфира не было. Классическая наука требовала существования дрейфа эфира и пыталась объяснить, почему, несмотря на ее ожидания, его не удалось обнаружить. Эйнштейн, отказавшись подгонять классическую науку под объяснение чуда, был вынужден заявить, что классическая наука ошибалась, придавая какое-либо значение существованию дрейфа эфира, и что ее вера в этот дрейф эфира была обусловлена ошибочными предпосылками.

Если мы теперь перейдем к проблеме гравитации, то увидим, что ситуация очень похожа. Сила гравитации исчезает в падающем лифте; это физический факт. Классическая наука заняла позицию, что сила на самом деле не исчезает, а компенсируется. Эйнштейн предпочитает предполагать, что если сила гравитации *кажется* исчезающей, то это потому, что она действительно исчезает.

С этими новыми взглядами сила гравитации, действующая в одной точке, теряет свои атрибуты абсолютности. Так же, как сила инерции, сила гравитации отражает взаимосвязь между выбранной системой отсчета и окружающими условиями мира. Так же как сила инерции может быть аннулирована путем изменения движения нашей системы отсчета, так и сила гравитации теперь может быть аннулирована. Это не означает, что сила гравитации нереальна. Она вполне реальна, поскольку ее можно обнаружить и измерить. Но она больше не является абсолютной; она относительна, как и сила инерции, поскольку ее значение варьируется в зависимости от выбранной нами системы отсчета. Отныне не существует внутренней разницы между силой тяжести и силой инерции; эти силы имеют одну и ту же сущность. Поэтому, когда мы имеем дело с силой, действующей на массу, мы можем называть ее силой, не уточняя, была ли она порождена ускорением нашей системы отсчета (поле инерции) или близостью материи (поле гравитации).^[182]

Эйнштейн сохраняет название гравитационного поля силы. Но он применяет его без разбора как к полям, которые классическая наука считала бы следствием ускорения системы отсчета, так и к полям, которые классическая наука признала бы как порожденные близостью материи. Классифицируя оба типа полей как гравитационные, он стремится отличить эти идентичные типы полей от полей других типов, таких как поля электрических, магнитных или электромагнитных сил.

Однако следует предупредить начинающего о недоразумении, которое может вызвать у него некоторые затруднения. В классической науке слово «гравитационный» всегда ассоциировалось с притяжением, вызванным материей. В теории Эйнштейна, когда мы отождествляем инерционное поле с гравитационным и называем оба эти вида полей гравитационными, это не означает, что точную копию инерционного поля можно воспроизвести, расположив материю подходящим образом по отношению к нашей системе отсчета. И наоборот, поле силы, создаваемое материей, не может быть воспроизведено во всех деталях путем придания соответствующего ускоренного движения нашей системе отсчета в свободном пространстве, удаленном от материи. Несмотря на полное отождествление сил гравитации и сил инерции, все же существует разница в пространственном распределении поля силы в зависимости от того, создается ли оно

близостью материи или ускорением нашей системы отсчета. Следовательно, хотя все поля силы можно назвать гравитационными полями, независимо от того, создаются ли они материей или ускорением, мы должны помнить, что фактическое расположение этих полей в пространстве будет варьироваться в зависимости от их происхождения.

Несколько точных иллюстраций помогут прояснить этот момент. Представьте себе пустой ящик, который невидимая рука тянет через межзвездное пространство вдали от материи. Если мы предположим, что сундук поднимается вертикально с постоянным ускорением, то мы знаем, что в результате этого постоянного ускорения внутри сундука будет присутствовать равномерное поле инерционной силы. Постулат эквивалентности состоит в утверждении, что наблюдатель, находящийся внутри сундука, может с одинаковой степенью обоснованности считать, что сундук не ускоряется или находится в покое в пространстве, в то время как поле силы, которое он воспринимает, будет ассимилировано с полем гравитации. Все, что здесь подразумевается, это то, что физическая природа полей гравитации и инерции одна и та же. Это не означает, что какое-либо реальное распределение материи может когда-либо создать идеально равномерное поле силы внутри грудной клетки, такое, какое существовало бы под воздействием постоянного ускорения. Мы знаем, что распределение материи под сундуком создало бы несколько похожее поле силы, но это поле было бы неоднородным, а величина силы в верхней части сундука была бы меньше, чем в его основании. Таким образом, хотя физическая природа обоих типов полей была бы одинаковой, точное распределение этих полей в пространстве было бы разным.

По крайней мере, это выводы, которых мы должны придерживаться на данном этапе развития теории. Мы увидим, что когда мы перейдем к рассмотрению Вселенной в целом, могут появиться основания для изменения наших мнений. Но на данном этапе обсуждения мы должны признать, что силовые поля, создаваемые материей, никогда не могут распределяться точно так же, как поля, создаваемые ускорением, и наоборот.

Другой пример — поле силы, создаваемое вращающимся диском. Это поле силы можно разделить для целей анализа на два отдельных поля: центробежное поле, состоящее из сил, направленных от центра диска, и поле Кориолиса, оттягивающее тела в стороны, когда они приближаются к центру или удаляются от него. На данном этапе невозможно представить себе такое распределение материи вокруг диска, которое создавало бы поле гравитации на диске, распределенное точно так же, как это поле инерции. Тем не менее, инерционное поле на диске можно назвать полем гравитации по причинам, изложенным ранее в этой главе.

Опять же, так же как материя не может создать поле силы, распределенное точно так же, как поле, создаваемое ускорением, так и невозможно создать только за счет ускорения поле силы, распределенное точно так же, как гравитационное поле вокруг материи. Из этого следует, что невозможно, просто выбрав подходящую ускоренную систему отсчета, полностью отменить поле силы, создаваемое материей. Это утверждение может показаться противоречащим примеру с падающим лифтом, в котором объяснялось, что благодаря движению лифта поле силы, создаваемое Землей, исчезало в его внутренней части. Однако между этими двумя утверждениями нет противоречия, если мы будем выражаться точно.

В падающем лифте внутри лифта не ощущается никакого поля силы, *при условии, что размер лифта невелик по сравнению с размером Земли*. Если бы лифт был очень большим, например, если бы это был гигантский ящик, полностью окружающий Землю, то никакое мыслимое движение ящика не могло бы привести к исчезновению гравитационного поля Земли во всем внутреннем пространстве ящика. Предположим, например, что крыша коробки ускоряется в направлении Северного полюса, тогда ее пол будет двигаться с

ускоренным движением в сторону от Южного полюса. Следовательно, в то время как наблюдатель, прикрепленный к крыше коробки, не будет ощущать силы тяжести, наблюдатель, прикрепленный к полу, будет испытывать силу удвоенной интенсивности. Другими словами, было бы невозможно устранить силу тяжести во всех частях коробки. Только когда коробка или лифт малы по сравнению с Землей, так что в пределах их границ поле, создаваемое нашей планетой, практически однородно, можно отменить поле Земли во всем внутреннем пространстве коробки. Однако даже в этом случае отмена будет строгой только в одной точке и будет уменьшаться по мере удаления от этой точки.

Из этого следует, что падающий лифт не может быть полностью приравнен к галилеевой системе отсчета, поскольку в галилеевой системе отсчета, где бы мы ни находились, никаких сил не ощущалось бы. Тем не менее, поскольку на практике рассматриваемые нами системы отсчета не должны простирались на большие расстояния во всех направлениях, условия, существующие в падающем лифте, будут с очень высокой степенью точности идентичны условиям, существующим в галилеевой системе отсчета. По этой причине жесткие системы отсчета небольших размеров, свободно падающие в гравитационном поле, называются *полугалилеевыми*.

Если мы обобщим выводы, сделанные в этой главе, то можем сказать, что постулат эквивалентности позволил нам отождествить силы инерции с силами гравитации. Но это отождествление относится исключительно к природе сил, а не к их пространственному распределению. Поэтому неверно утверждать, что нам невозможно определить, было ли поле силы, испытываемое в нашем помещении, вызвано ускорением помещения или близостью гравитирующих масс. Даже не выглядывая наружу и не обнаруживая наличие больших масс, мы всегда могли бы, по крайней мере теоретически, путем простого исследования распределения поля установить истинные условия.

Таким образом, мы видим, что в то время как скорость была относительной, поскольку нам было совершенно невозможно установить абсолютную скорость нашего помещения, ускорение остается абсолютным, несмотря на постулат, поскольку (по крайней мере теоретически) его всегда можно обнаружить и отделить его эффекты от эффектов, вызванных материей. Фактически, как мы увидим позже, полная относительность всех движений может быть установлена только в том случае, если вселенная конечна. В этих условиях мы должны быть осторожны, чтобы не переоценить философское значение постулата в его отношении к относительности движения.

Теперь можно было бы подумать, что из-за этого фундаментального различия в пространственном распределении силовых полей (инерционного и гравитационного) постулат не будет иметь большого значения в своих физических приложениях. Но такая точка зрения была бы ошибочной. С чисто качественной точки зрения постулат позволяет нам утверждать, что любое явление, на поведение которого должно влиять ускорение ограждения, должно быть также чувствительным к присутствию гравитационного поля, создаваемого материей. Поскольку часто легко увидеть, что ускорение нашей системы отсчета неизбежно изменяет наблюдаемое поведение явления, мы можем сделать вывод, что на это же явление будет влиять и гравитационное поле, создаваемое материей.

Именно следуя этому методу, Эйнштейн смог предсказать ряд гравитационных эффектов, о которых классическая наука даже не подозревала. Главными из них являются искривление луча света в гравитационном поле и *эффект Эйнштейна*, наблюдаемый на спутнике Сириуса.

Мы можем без труда понять, как было предсказано искривление луча света. Представим себе коробку, парящую в пустом пространстве вдали от материи. Волна света проникает

через щель в стене и проходит через коробку по линии, параллельной полу. Но если теперь коробка будет равномерно ускоряться, пол будет ускоренно продвигаться поперек луча. По отношению к коробке луч света будет таким образом принимать искривленную траекторию, точно так же, как траектория пули будет казаться искривленной в аналогичных условиях.^[83] Тогда постулат эквивалентности позволяет нам утверждать, что точно такие же результаты были бы получены, если бы камера находилась в покое в равномерном гравитационном поле; таким образом, независимо от того, могут ли существовать *равномерные гравитационные поля*, создаваемые материей, мы приходим к общему выводу, что гравитационное поле изгибает траекторию световых волн и изменяет их скорость.

Именно это качественное открытие имеет важное значение и представляет собой факт, который был неизвестен классической науке. Каким будет точный путь луча света в неоднородном гравитационном поле, создаваемом материей, — это вопрос другого порядка.

Однако этот постулат позволяет нам ответить на этот вопрос, если мы знаем, как гравитационное поле распределено в пространстве вокруг материи. Мы можем понять этот момент следующим образом: благодаря постепенным изменениям от места к месту даже неоднородное поле можно рассматривать как однородное, если мы ограничим свое внимание очень маленькими областями пространства.^[84] Отсюда следует, что мы можем разложить неоднородное поле на ряд смежных объемов пространства, каждый из которых можно ассимилировать к пространствам в замкнутых системах, обладающих соответствующими однородными ускорениями. Следовательно, если задано пространственное распределение неоднородного гравитационного поля, мы можем вывести (в соответствии с методами дифференциальной геометрии) траекторию луча света от места к месту на смежных бесконечно малых расстояниях. Таким образом, предполагая, что закон Ньютона верен, Эйнштейн вывел кривизну луча света в гравитационном поле Солнца. Он обнаружил, что для луча, скользящего по краю Солнца, отклонение будет равно $0,87''$, что составляет всего половину того, что он установил впоследствии, после того как признал, что закон Ньютона не может быть верным.

В других случаях нас не интересует изучение явления, распространяющегося на большие площади; достаточно его поведения на небольшой площади, например, в нашей комнате. В этом случае, конечно, гравитационное поле Земли всегда можно считать однородным; таким образом, рассматривая эффект, возникающий при введении постоянного ускорения подходящей величины, можно предсказать действие гравитации на наше явление.

В общем плане постулат эквивалентности привел Эйнштейна к следующим выводам: поскольку инерционная масса и гравитационная масса являются одним и тем же, все формы существования, обладающие инерционной массой, должны также проявлять вес в гравитационном поле. Следовательно, поскольку все формы энергии обладают инерционной массой, мы видим, что энергия имеет вес. Горячий кирпич весит больше, чем холодный, заряженный электричеством предмет весит больше, чем нейтральный; возможно, также живое животное весит больше, чем мертвое, и так далее. И наоборот, все формы энергии должны развивать гравитационное поле.

На следующих страницах мы покажем, что постулат эквивалентности, который в настоящей главе был выведен как обобщение из равенства двух масс, может быть также выведен чисто рациональным путем из существования пространства-времени. Таким образом, мы сможем понять, как все эти открытия, касающиеся сил и гравитации, могут быть вплетены в общую ткань пространства-времени.

ГЛАВА XXV

ВКЛЮЧЕНИЕ ГРАВИТАЦИИ В МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

В предыдущей главе были установлены следующие результаты:

1. Существенного различия между гравитационным полем, создаваемым материей, и инерционным полем, создаваемым ускорением нашей системы отсчета (постулат эквивалентности), не существует.

2. Хотя эти два типа силовых полей по сути своей одинаковы, фактическое распространение гравитационного поля вокруг материи никогда не совпадает с распространением поля, создаваемого ускорением системы отсчета в свободном пространстве, удаленном от материи. В результате этой особенности, в то время как всегда можно полностью компенсировать поле силы, изменив движение нашей системы отсчета подходящим образом, когда рассматриваемое поле существует в областях, удаленных от материи, с другой стороны, вблизи материи поле силы может быть изменено и даже компенсировано в небольшой области, но никогда не может быть компенсировано на большой площади. Это похоже на выпуклость, которую можно сгладить в одном месте, но она снова появится с большей интенсивностью в другом месте.

Эти результаты мы должны включить в общую модель пространства-времени, если только мы не отвергаем постулат эквивалентности Эйнштейна и не утверждаем, что поля гравитации, создаваемые материей, не имеют ничего общего с полями инерции, как, например, с электромагнитными полями. Постулат эквивалентности, как мы видели, кажется оправданным в силу эмпирического факта, что два типа масс идентичны. Но теперь мы предлагаем показать, что совершенно независимо от этого эмпирического факта, даже если бы постулат эквивалентности никогда не был сформулирован конкретно, естественное математическое обобщение геометрии пространства-времени привело бы нас косвенно к точно такому же отождествлению сил инерции и гравитации. Соответственно, давайте кратко вспомним результаты, к которым мы пришли в [главе XXIII](#), когда исследовали происхождение сил инерции в нашей модели пространства-времени.

Мы помним, что пространство-время предполагалось абсолютно плоским, так что его геодезические линии были евклидовыми прямыми, если относиться к декартовым сеткам равных четырехмерных кубов. Эти декартовы сетки, разбивающие пространство-время на взаимно перпендикулярные прямолинейные направления, составляли геометрические представления наших методов разбиения пространства-времени на пространство и время с целью отнесения наших измерений к галилеевым системам отсчета. В этих декартовых сетках потенциалы пространства-времени (g_{ik}) сохраняли постоянные значения на всем протяжении, а числовые значения этих потенциалов (g_{ik}) представляли потенциалы поля инерционной силы. Поскольку эти потенциалы были постоянными и оставались неизменными по значению от одной точки к другой в наших декартовых системах координат (), никакое поле силы не могло присутствовать; и это полностью соответствовало тому, что мы знаем о галилеевых системах, поскольку эти системы характеризуются полным отсутствием всех подобных полей. Кроме того, поскольку все свободные тела и световые волны следовали геодезическим линиям в пространстве-времени в соответствии с требованиями принципа наименьшего действия, а эти геодезические линии, если относиться к декартовым системам, были прямыми линиями,

свободные тела и световые волны всегда казались следующими по прямым линиям с постоянной скоростью, если наблюдать их из галилеевых систем отсчета. Это соответствовало закону инерции Ньютона.

Впоследствии мы увидели, что ускоренные системы отсчета, движущиеся в межзвездном пространстве, будут представлены криволинейными или гауссовыми сетчатыми системами. В этих системах значения « g_{ik} » пространства-времени больше не были постоянными, а варьировались от места к месту. Это изменение значений « g_{ik} » означало изменение значений потенциалов; в результате математическое выражение силы (данное отношениями между этими изменениями) больше не исчезало. Таким образом, эти криволинейные сетчатые системы представляли системы, в которых присутствовали бы поля силы. Это снова полностью согласовалось с тем, что мы знали об ускоренных или негалилеевых системах отсчета. Кроме того, в отношении этих криволинейных сеточных систем геодезические линии пространства-времени казались бы искривленными. Физическое значение этого факта заключалось бы в том, что движение свободных тел и световых волн казалось бы ускоренным, если смотреть на него из ускоренных систем отсчета. И снова очевидно полное согласие с экспериментом.

Теперь перейдем к естественному обобщению этих результатов. До сих пор мы предполагали, что пространство-время является плоским. Действительно, мы не могли бы избежать этого предположения, если бы признали, что галилеевы системы отсчета, свободные от всех силовых полей, могут существовать в пространстве, удаленном от материи, и что, если наблюдать из этих систем отсчета, геодезические линии пространства-времени будут евклидовыми прямыми линиями. Только так можно было бы проверить закон Ньютона о движении свободных тел в межзвездном пространстве. Но предположим теперь, что по той или иной причине пространство-время приобрело бы неевклидовость или кривизну и таким образом отошло бы от своей плоскости. Как такое состояние проявилось бы физически?

Во-первых, было бы невозможно разделить это искривленное пространство-время на прямые направления, которые определяют декартову систему координат. С физической точки зрения это означало бы, что в тех областях, где пространство-время было искривлено, не могло бы существовать никаких галилеевых систем. Конечно, мы могли бы представить себе системы координат, менее искривленные, чем другие, но даже самая прямая из этих систем в лучшем случае была бы только приблизительно декартовой в ограниченной области. По мере того как мы рассматривали бы части системы координат, все более удаленные от этой особой области, ячейки становились бы все более редкими или все более скученными.

Элементарную иллюстрацию этого можно получить, рассмотрев искривленную поверхность двух измерений, такую как поверхность сферы. На сфере мы можем проследить бесконечное множество сеточных систем, но ни одна из этих сеточных систем не состоит из равных евклидовых квадратов. Наиболее близким приближением к сети квадратов была бы сеточная система из меридианов и параллелей. Но даже сетка такого рода может быть сравнена с сетью равных квадратов только в непосредственной близости от экватора. При рассмотрении нашей сетки в областях, все более удаленных от экватора, мы заметим, что меридианы имеют тенденцию сближаться, так что четырехугольники, ограниченные меридианами и параллелями, все больше и больше отличаются по форме от евклидовых квадратов. В общем случае, когда мы рассматриваем произвольно изогнутую поверхность, а не равномерно изогнутую, такую как сфера, можно показать, что самый прямой тип системы сеток, совместимый с поверхностью, можно сравнить с системой квадратов только вокруг одной точки, а не, как в случае сферы, вдоль линии (такой как экватор). Точка может быть

выбрана произвольно, и наша псевдопрямая сетка будет соответственно построена вокруг этой точки.

Таким образом, мы видим, что если пространство-время неравномерно искривлено или неравномерно неевклидово, то ближайший подход к декартовой сетке вокруг любой заданной точки может быть приблизительно декартовым только в ограниченной области вокруг этой точки. По мере удаления от этой точки в нашей сетке ее криволинейные характеристики будут становиться все более и более выраженными. Что касается « g_{ik} » пространства-времени, это означает, что в области « ϵ », где присутствует кривизна, эти « g_{ik} » могут сохранять постоянные значения только в более или менее непосредственной близости от точки. Выраженное в терминах силовых полей, это утверждение эквивалентно утверждению, что в области кривизны пространства-времени было бы совершенно невозможно избавиться от силового поля во всем пространстве. Мы могли бы аннулировать его в этой точке и в ее непосредственном окрестностях, но поле силы вновь появилось бы в более отдаленных областях.

Легко видеть, что эти физические условия точно соответствуют тем, которые мы обнаружили в гравитационном поле, создаваемом материей. Самая прямая система координат вокруг точки (а именно, полудекартова система координат) будет соответствовать системе координат наблюдателя в падающем лифте или в полом снаряде, поскольку для наблюдателя в системе координат этого типа сила тяжести исчезает в непосредственной близости от его системы координат, но появляется снова в более отдаленных точках. Кроме того, поскольку пространство-время искривлено, его геодезические линии больше не будут евклидовыми прямыми. Они по-прежнему будут казаться приблизительно прямыми, если рассматривать их в полудекартовой сетке в непосредственной близости от точки, для которой сетка была приблизительно равна четырехмерным кубам; но их кривизна будет становиться все более заметной, если мы будем наблюдать их из этой же сетки в более удаленных областях. Физическая интерпретация этого геометрического факта будет обеспечена кажущимся равномерным и прямолинейным движением свободных тел и лучей света в непосредственной близости от падающего лифта, если смотреть на них наблюдателю, находящемуся в этой падающей системе отсчета, и кажущимся ускорением этих тел в областях, более удаленных от падающего лифта.

Поэтому очевидно, что существование неевклидова пространства-времени вокруг материи проявлялось бы физически точно так же, как поле гравитации, создаваемое материей.^[85] Если предположить, что это обобщение верно, то мы видим, что между гравитационным полем и полем инерции не может быть существенной разницы. Оба типа полей возникают из взаимосвязи между системой координат, принятой наблюдателем, и фундаментальной структурой пространственно-временного континуума. Единственное существующее различие заключается в том, что в межзвездном пространстве, удаленном от материи, где пространство-время является плоским, всегда можно выбрать декартову систему координат, соответствующую галилеевой системе, в которой нет поля силы, тогда как вблизи материи, из-за присущей пространству-времени кривизны, наибольшее сходство с галилеевыми системами координат имеют полудекартовы или полугалилеевы системы координат (падающий лифт). В таких системах координат поле силы не может исчезать во всей системе координат в более или менее удаленных точках.

Из этого следует, что те же самые потенциалы (g_{ik}), значения которых в данной системе координат представляли потенциалы поля инерции, теперь с равной степенью обоснованности могут рассматриваться как потенциалы поля гравитации. Математическое выражение, включающее вариации потенциалов (g_{ik}) от точки к точке, которое ранее было

доказано как представляющее силу инерции, теперь с равной степенью обоснованности может рассматриваться как представляющее силу гравитации. Как и в случае с силой инерции, это математическое выражение силы, зависящее от вариаций значений g_{ik} от точки к точке, варьируется в зависимости от нашего выбора системы координат; точно так же величина гравитационной силы в нашей системе отсчета варьируется в зависимости от ускорения нашей системы (как было установлено при обсуждении постулата эквивалентности). Кроме того, значение математического выражения этой силы полностью исчезнет во всей системе координат, если эта система координат является декартовой, тогда как оно исчезнет только вокруг определенной точки, когда из-за кривизны пространства-времени декартова система координат невозможна, так что мы должны довольствоваться полудекартовой системой. Мы видим, что аналогия полна во всех отношениях.

Здесь следует заметить, что, отождествляя потенциалы Эйнштейна (g_{ik}) в данной системе сеток с гравитационными потенциалами в системе отсчета, соответствующей этой системе сеток, мы сталкиваемся с таким же количеством различных гравитационных потенциалов, сколько есть отдельных потенциалов Эйнштейна (g_{ik}). То есть у нас есть десять различных потенциалов. Ньютон знал только один из них, ньютоновский потенциал, который оказывается ⁹⁴⁴ — тем, который направлен вдоль оси времени системы сеток. Именно наличие этих других потенциалов, игнорированных Ньютоном и открытых Эйнштейном, ответственно за основные различия, отличающие закон движения планет Ньютона от закона Эйнштейна. Таким образом, мы видим, что это естественное обобщение геометрии пространства-времени, заставляя нас признать силы гравитации и инерции как имеющие одинаковую природу, приводит нас к точно таким же выводам, которые были получены Эйнштейном, когда он исходил из постулата эквивалентности. Таким образом, хотя мы сделали акцент на постулате эквивалентности как на отдельном открытии, чтобы следовать исторической последовательности исследований Эйнштейна (), мы видим, что, рассматривая проблему с более высокой точки зрения, этот постулат не добавляет ничего к тому, что обычно было бы открыто или, по крайней мере, предположено в результате более философского обобщения, которое мы обсудили.

Конечно, если бы постулат эквивалентности оказался необоснованным, как это было бы в случае, если бы эксперимент выявил разницу между инерционной и гравитационной массой, то обобщение также было бы необоснованным, и гравитацию никогда нельзя было бы приписать искривлению пространства-времени. Однако, поскольку самые точные эксперименты неизменно показывали полную идентичность двух типов масс, обобщение пространства-времени представляется обоснованным.

ГЛАВА XXVI

ТЕНЗОРЫ И ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ

Мы подошли к моменту, когда для дальнейшего продвижения вперед необходимо иметь хотя бы элементарные представления о тензорах и абсолютном исчислении. Мы постараемся изложить эти вопросы как можно яснее, рассмотрев сначала тензоры с точки зрения чистой математики, без ссылки на их применение в теории Эйнштейна.

Предположим, что мы имеем дело с обычным трехмерным евклидовым пространством классической науки. Мы помним, что часто удобно относить положения объектов, расположенных в пространстве, к какой-либо определенной системе отсчета или системе координат. Эта процедура эквивалентна построению воображаемой трехмерной системы сеток, относительно которой мы определяем точки пространства. Точная форма этой системы координат является произвольной. Она может разбивать пространство на равные кубы (в этом случае она называется декартовой), или же она может быть криволинейной и разбивать пространство на объемы неправильной формы. Однако во всех случаях мы будем предполагать, что эти системы координат остаются фиксированными и не изменяют свою форму или ориентацию после того, как они были начерчены.

Теперь, хотя мы и заявили, что точная форма системы координат, или системы сеток, является произвольной, существуют математические причины, которые делают использование декартовых систем особенно удобным. До тех пор, пока мы имеем дело с евклидовым пространством, в котором, как мы знаем, декартовы системы сеток всегда допустимы, нам не нужно беспокоиться о гауссовых системах координат. Именно по этой причине классическая наука, занимаясь физическими проблемами, ограничивалась декартовыми координатами; а под изменением системы координат понималось вращение или смещение декартовой системы отсчета из одного положения в другое.

Тем не менее, мы всегда должны были учитывать возможность необходимости исследования задач, в которых декартовы системы координат были бы неприменимы из-за кривизны или неевклидовости континуума. Соответственно, еще до появления теории относительности математики стремились усовершенствовать форму исчисления, которая освободила бы их от любой зависимости от конкретного типа системы координат. Эта задача была решена в основном Леви-Чивита и Риччи, и разработанный математический инструмент получил название *абсолютного исчисления*. Итак, когда в общей теории Эйнштейн пришел к своей концепции искривленного или неевклидова пространства-времени, в котором декартовы системы координат были невозможны, необходимый ему математический инструмент был уже под рукой. Ему оставалось только применить его на практике.

Хотя в евклидовом пространстве классической физики, которое мы сейчас предлагаем обсудить, не было необходимости рассматривать гауссовы или криволинейные системы координат, тем не менее, ввиду большей общей применимости метода, мы будем рассматривать предмет этой главы с точки зрения всех систем координат, будь то гауссовы или декартовы. Однако выводы, к которым мы придем, должны быть истолкованы как применимые ко всем типам систем координат. Если эти предварительные моменты понятны, мы можем перейти к более подробному обсуждению проблемы.

Рассмотрим прямой стержень, расположенный в этом пространстве. Если мы согласимся на единицу измерения, то сможем присвоить стержню определенную длину. Очевидно, что эта длина, какой бы она ни была, не изменится при изменении нашей системы координат в пространстве. Величины такого рода, которые во всех отношениях выходят за пределы выбранной нами системы координат, называются **скалярными величинами, числами** или **инвариантами**.

Но предположим теперь, что мы хотим определить точное положение нашего стержня. Положение, в отличие от длины, не имеет смысла до тех пор, пока не будет задана некоторая система координат; ведь мы можем определить направление в пустом пространстве, только соотнеся его с некоторой принятой системой стандартных направлений в каждой точке. Сетки нашей системы координат в каждой точке, конечно, определяют для нас такие стандартные направления. Поэтому, когда мы пытаемся определить ориентацию стержня, мы проецируем его длину на три сетки, проходящие через один из его концов. Таким образом, мы получаем так называемые три компонента стержня; и когда эти три компонента известны, ориентация и длина стержня полностью определены.^[486]

Из этого примера мы видим, что существует значительная разница между направленной величиной, которую мы здесь рассматриваем, и инвариантной величиной, которая была задана простой длиной стержня, независимо от его ориентации. В то время как инвариантная величина не имела компонент, направленная величина имеет столько компонент, сколько измерений имеет пространство, в данном случае три. Направленная величина такого рода называется **вектором**.

Предположим теперь, что мы изменяем нашу систему отсчета, например, слегка поворачиваем ее. Таким образом, мы получим три новые компоненты для нашего вектора в новой системе координат, и эти новые компоненты будут отличаться по величине от прежних. Однако изменение значения компонент при определенном изменении системы отсчета не является произвольным, а подчиняется четко определенным математическим правилам.^[487] Этот факт позволяет нам обнаружить критерий объективности.

Предположим, что в первой системе координат измерением выявлены определенные компоненты X, Y, Z , а во второй системе координат получены новые компоненты X', Y', Z' . Если бы в этих условиях мы обнаружили, что две тройки компонент X, Y, Z и X', Y', Z' не связаны между собой строгими математическими правилами, о которых мы говорили, нам пришлось бы признать, что мы не могли рассматривать один и тот же вектор при переходе от первой системы координат ко второй. И наоборот, если бы компоненты соответствовали математическим правилам, мы бы поняли, что действительно имеем дело с одним и тем же вектором. Таким образом, вектор больше не был бы неопределенной величиной. Он был бы определенной и точной величиной, которой мы могли бы приписать объективное существование, выходящее за пределы нашего выбора системы координат. Сами компоненты не имеют абсолютного существования; они не выходят за пределы нашей системы координат. Они представляют собой лишь частичные аспекты вектора, простые моды или тени, которые варьируются в зависимости от нашей системы координат. Но самому вектору можно приписать объективное существование.

Математические исследования вскоре показали, что существует два разных типа векторов, различающихся по двум разным правилам математического преобразования при переходе от одной системы координат к другой. Поскольку эти два правила математического преобразования, известные как **контравариантное** и **ковариантное**

правило, соответственно, оказались единственными последовательными, было признано, что существует только два разных типа векторов, так называемый **контравариантный вектор** и **ковариантный вектор**. В определенном смысле это различие является несколько искусственным, поскольку мы всегда можем рассматривать данный вектор как контравариантный или ковариантный, как нам удобно. Все, что мы хотим сказать этой терминологией, это то, что мы намерены подвергать компоненты вектора контравариантному или ковариантному правилу преобразования, когда мы меняем нашу систему координат.

До сих пор мы рассматривали два типа величин: инварианты или скаляры и векторы. Однако математики обнаружили, что существует огромное множество других типов величин, называемых тензорами,⁽¹⁸⁸¹⁾ компоненты которых также подчиняются жестким правилам математического преобразования при переходе от одной системы координат к другой и которые по этой причине могут быть признаны, так же как векторы и инварианты, объективно существующими вне нашей системы координат. Тензоры отличались от векторов большим количеством компонентов. В то время как вектор имел столько компонентов, сколько было измерений пространства, тензор мог иметь гораздо большее количество. В зависимости от количества компонентов в пространстве заданного числа измерений тензоры группировались в тензоры второго порядка, третьего порядка, n -го порядка.

В трехмерном пространстве тензор второго порядка имеет девять компонентов вместо трех, как вектор. Тензор третьего порядка имеет двадцать семь компонентов и так далее. Как и в случае с векторами, значения компонент тензора, расположенного в точке пространства, варьируются в зависимости от выбора нашей системы координат, и, опять же, как и в случае с векторами, значения компонент в одной системе координат связаны со значениями в другой системе координат жесткими математическими правилами преобразования. Однако в данном случае эти правила преобразования более сложны. Они представляют собой обобщения правил, регулирующих преобразования компонент вектора. Как непосредственное следствие, тензоры представляются простыми обобщениями более старых известных векторов.

В частности, было обнаружено, что вектор является ни чем иным, как тензором первого порядка, а инвариант — тензором нулевого порядка. Таким образом, общее название «тензор» обозначает все типы математических величин, которые обладают объективным значением, выходящим за пределы нашей системы координат, хотя часто будет удобно оставлять название «тензор» для тензоров второго и более высоких порядков, сохраняя при этом классические названия «вектор» и «инвариант» для тензоров более низкого порядка.

Теперь мы увидим, что различие, которое мы провели между двумя различными типами векторов (контравариантными и ковариантными), автоматически распространяется на тензоры. Рассмотрим, например, тензор второго порядка. Когда мы меняем нашу систему координат, девять компонентов этого тензора изменяются, и чтобы получить их значения в новой системе координат, мы применяем правило преобразования, которое, так сказать, является векторным правилом, взятым дважды подряд. Поскольку существует два векторных правила, одно контравариантное и одно ковариантное, в случае тензоров второго порядка мы получаем дважды контравариантное правило, дважды ковариантное правило или смешанное правило, которое является одновременно контравариантным и ковариантным. Таким образом, мы приходим к выделению трех различных типов тензоров второго порядка: дважды контравариантных, дважды ковариантных и смешанных.

Здесь необходимо отметить, что два правила, контравариантное и ковариантное, в некотором смысле являются антитезами друг друга. Одно правило отменяет другое. Поэтому, если мы объединим любой вектор, считающийся контравариантным, с любым вектором, считающимся ковариантным, результат будет похож на то, что происходит, когда белка бежит в барабане, вращающемся в обратную сторону. Переднее движение белки противодействует обратному движению барабана, так что в конечном итоге белка не двигается вообще. Результатом объединения контравариантного и ковариантного векторов будет, следовательно, получение скалярного или инвариантного величины. Точно так же ковариантный тензор второго порядка, объединенный с двумя контравариантными векторами, или ковариантный тензор, объединенный с контравариантным тензором того же порядка, дадут инвариантную величину.

Перейдем теперь к одной из важнейших характеристик тензоров и векторов. Тот факт, что компоненты всех контравариантных векторов подчиняются одним и тем же правилам изменения при переходе от одной системы координат к другой, доказывает, что если два контравариантных вектора, расположенные в одной и той же точке пространства, равны, то есть если компоненты одного равны компонентам другого в нашей системе координат, то это равенство неизбежно сохранится в любой другой системе координат. Другими словами, равенство двух векторов в одной точке пространства представляет собой равенство, которое изменение нашей системы координат никогда не может нарушить; таким образом, это равенство является абсолютным. Аналогичные выводы применимы к равенству двух тензоров в одной и той же точке пространства.

Однако следует отметить, что это равенство сохраняется только потому, что компоненты любого вектора или любого тензора по обе стороны уравнения подчиняются одним и тем же правилам преобразования при изменении нашей системы координат. Это означает, что мы имеем дело с векторами одной и той же природы (ковариантными или контравариантными) или с тензорами одной и той же природы и порядка. Если эти условия выполняются, мы видим, что уравнения между векторами или тензорами, часто называемые векторными уравнениями и **тензорными уравнениями**, обладают замечательным свойством оставаться неизменными при изменении системы координат.

В определенном смысле векторные уравнения и тензорные уравнения составляют инвариантные или абсолютные уравнения. Последнее название было бы вполне оправданным, если бы мы рассуждали в терминах абсолютных векторов и тензоров, которые существуют независимо от нашей системы координат. Но на практике очень трудно обойтись без системы координат. В результате мы сталкиваемся — то, что мы измеряем в реальности — не с самим вектором или тензором, которые являются абсолютными, а с их компонентами в выбранной нами системе координат. Эти компоненты являются относительными, поскольку их значение изменяется при изменении системы координат. Правда, эти изменения одинаковы по обе стороны уравнения, поэтому равенство сохраняется независимо от нашего выбора системы координат. Но, с другой стороны, произошло определенное численное изменение значения по обе стороны нашего уравнения. Форма уравнения в целом осталась неизменной, но содержание обеих сторон изменилось.

Давайте объясним этот момент более подробно. Рассмотрим два вектора, которые находятся в одной точке и равны друг другу. В трехмерном пространстве это равенство выражается соответствующим равенством трех компонентов первого вектора с тремя компонентами второго вектора в нашей системе координат; следовательно, мы имеем три уравнения, такие как

$$X_1 = X_2; \quad Y_1 = Y_2; \quad Z_1 = Z_2.$$

Если теперь мы изменим нашу систему координат, компоненты обоих векторов изменятся точно так же, так что наши уравнения останутся в силе. Однако в новой системе

координат X_1 становится X'_1 , а X_2 становится X'_2 и т. д., так что теперь мы имеем

$$X'_1 = X'_2; \quad Y'_1 = Y'_2; \quad Z'_1 = Z'_2.$$

Очевидно, что, хотя уравнения сохраняются, выражения по обе стороны наших трех уравнений изменились, поскольку X'_1 отличается от X_1 и т. д. Таким образом, мы видим, что было бы не совсем правильно утверждать, что наши уравнения остались полностью неизменными при переходе от одной системы координат к другой.

По этим причинам принято говорить о **ковариации**, а не об **инвариантности** векторных или тензорных уравнений. Слово «ковариация» выражает тот факт, что обе стороны изменились точно одинаково. Название «инвариантность» склоняет нас к мысли, что ни одна из сторон не изменилась, что, конечно, было бы неверно. Короче говоря, мы должны помнить, что именно соотношение равенства между двумя сторонами, а не отдельные термины сами по себе, остаются неизменными при изменении системы координат.^[189]

Существует еще один тип векторных и тензорных уравнений. Если, например, вектор или тензор исчезает, это означает, что все компоненты исчезают по отдельности. Простой взгляд на правила преобразования показывает, что в этом случае все компоненты будут продолжать исчезать в любой системе координат, так что приравнивание тензора, вектора или инварианта к нулю в точке пространства будет сохраняться во всех системах координат, если оно сохраняется в какой-либо конкретной системе.

Подводя итог, мы видим, что существует два типа ковариантных уравнений:

Первый тип задается равенством двух векторов (оба вектора являются ковариантными или оба контравариантными) или, более обще, равенством двух тензоров, эти тензоры имеют одинаковый порядок и одинаковую природу (*т. е.* ковариантные, смешанные или контравариантные). Предельный случай задается равенством двух инвариантов; тогда мы получим инвариантное уравнение.

Второй тип задается исчезновением вектора или тензора в точке пространства. Предельный случай будет задаваться исчезновением инварианта.

Все эти выводы, полученные математически, в определенном смысле являются самоочевидными с физической точки зрения, если вспомнить, что тензор, вектор и инвариант представляют собой величины, которым можно приписать объективное существование. Действительно, очевидно, что если две такие величины равны друг другу в одной точке пространства, то простое изменение нашей системы координат никогда не может нарушить это внутреннее равенство. Точно так же, если конкретная сущность, такая как тензор, исчезла в точке пространства, простое изменение нашей системы координат не способно вернуть ее к существованию. И снова мы осознаем строгую зависимость, которая существует между физическими представлениями такого рода и тем фактом, что

инварианты, векторы и тензоры должны быть признаны как имеющие объективное существование, выходящее за пределы конкретной точки зрения нашей системы координат.

Если эти математические соображения были поняты, мы можем перейти к физическим применениям этих чисто математических открытий. На данный момент мы ограничимся трехмерным евклидовым пространством классической науки ; следовательно, под изменением системы координат мы снова подразумеваем простое изменение формы, положения и ориентации нашей системы сеток. *Мы не имеем в виду переход от одной системы к другой в относительном движении по отношению к ней.*

В классической науке мы часто сталкиваемся с инвариантами и векторами. Примерами инвариантов являются масса и плотность массы тела. Векторы иллюстрируются скоростью, ускорением, силой, смещением; и мы можем сказать, что в общем случае вектор может быть представлен стрелкой. Простейшая физическая иллюстрация тензора в каждой точке пространства дается состоянием сжатия и растяжения в каждой точке деформированной упругой среды.

Невозможно выразить это состояние напряжения и сжатия в точке с помощью трех компонентов в нашем трехмерном пространстве. Из-за побочных скручивающих эффектов в каждой точке необходимо девять компонентов, и мы понимаем, что больше не можем обращаться к вектору. Теперь мы имеем дело с тензором. Таким образом, становится очевидным физическое происхождение названия «тензор», придуманного Уиллардом Гиббсом. В данном случае тензор является тензором второго порядка и, кроме того, является так называемым **симметричным тензором**. Характеристики симметричного тензора определяются тождеством некоторых его компонентов по два; это уменьшает количество независимых компонентов тензора второго порядка в трехмерном пространстве с девяти до шести.

Можно доказать, что числа g_{ik} , о которых мы часто упоминали, составляют симметричные ковариантные тензоры второго порядка. Тензорная природа g_{ik} означает не что иное, как то, что компоненты g_{ik} в нашей системе координат изменяются в соответствии с правилами тензоров, когда мы переходим от одной системы координат к другой. Поскольку g_{ik} являются ковариантными тензорами второго порядка, мы можем сделать вывод, что, комбинируя их с двумя смещениями или векторами противоположной природы (т. е. контравариантными векторами), мы получим инвариант. Именно по этой причине $\sum g_{ik} dx_i dx_k$ дает инвариант ^[90] , который, как мы знаем, является ни чем иным, как квадратом длины ds .

В трехмерном пространстве существует девять компонент g_{ik} , но, поскольку тензор g_{ik} является симметричным, это число сокращается до шести. Таким образом, $g_{12} = g_{21}$; $g_{13} = g_{31}$; $g_{23} = g_{32}$. По этой причине в случае трехмерного пространства мы можем записать ds^2 следующим образом:

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + 2g_{13}dx_1dx_3 + g_{22}dx_2^2 + \dots\dots,$$

вместо

$$g_{11}dx_1^2 + g_{12}dx_1dx_2 + g_{21}dx_2dx_1 + \dots\dots$$

Когда мы приступаем к изучению конкретного значения g_{ik} , мы обнаруживаем, что они выражают углы между нашими координатными сетками и общую форму нашей системы сеток в разных местах. Однако, поскольку форма нашей системы координат, хотя и является в значительной степени произвольной, тем не менее ограничена определенными типами, совместимыми со структурой пространства, в котором мы их отслеживаем, эти g_{ik} также представляют структуру или геометрию нашего пространства. По этой причине они называются **структурными** или **фундаментальными тензорами**.

Напомним еще раз, что мы пока не имеем дело с открытиями Эйнштейна или пространством-временем; мы обсуждаем трехмерное пространство, и все, что мы сказали, относится к доэйнштейновской науке.

Другие примеры тензоров можно найти в угловой скорости и магнитной силе. Тензорная природа этих двух величин менее очевидна, поскольку эти тензоры второго порядка относятся к особому типу, известному как *антисимметричные*. В тензорах этого типа некоторые компоненты всегда равны нулю во всех системах координат, а остальные имеют одинаковую величину, но противоположный знак. В результате в трехмерном пространстве антисимметричные тензоры второго порядка обладают только тремя независимыми компонентами, как и векторы, и по этой причине часто изображаются стрелками и путаются с векторами. На самом деле, эта путаница не должна возникать, поскольку очевидно, что, например, вращение лучше представлять спиральной кривой, чем стрелкой, и то же самое относится к магнитной силе, когда мы понимаем, что она генерируется вращением электронов. В любом случае, если бы не случайный факт, что пространство имеет три измерения, путаница никогда бы не возникла, поскольку в четырехмерном пространстве антисимметричные тензоры второго порядка имеют количество компонент, превышающее четыре (что является количеством компонент вектора в четырехмерном пространстве). Еще одним примером антисимметричного тензора второго порядка является элемент поверхности.

Короче говоря, мы видим, что величины, которые в основном интересовали классическую науку, были либо инвариантами, либо векторами, либо тензорами. В этом нет ничего удивительного, учитывая, что величины, которым физическая наука уделяет наибольшее внимание, всегда являются теми, которым мы можем приписать объективное существование, выходящее за рамки нашего выбора системы координат. Таким образом, сам объект кажется более значимым с точки зрения объективности (), чем форма его тени, поскольку тень будет меняться при изменении ориентации и формы поверхности, на которую она падает, в то время как существование объекта будет выходить за рамки любых таких изменений.

Если теперь мы рассмотрим законы природы, то по двум разным причинам можем предположить, что они должны быть векторными или тензорными уравнениями. Во-первых, потому что все те физические величины, которым мы приписываем объективное существование и которые входят в выражение законов природы, являются инвариантами, векторами и тензорами; и, во-вторых, потому что закон природы, очевидно, не должен зависеть от простого изменения ориентации или формы нашей системы отсчета.

Действительно, очевидно, что система координат является лишь искусственным средством вычисления. Она не может иметь внутреннего значения, и, по сути, мы могли бы вообще обойтись без нее. Такое абсолютное условие мира, как равенство двух векторов в одной точке или исчезновение вектора или тензора, сохранилось бы даже в том случае, если бы системы координат никогда не были изобретены Декартом и Гауссом. Предположим, что

закон действовал, когда мы выбрали какую-то конкретную систему координат, но перестал действовать, когда наши координаты были сжаты или повернуты в новое положение. Очевидно, что наш закон не обладал бы общей значимостью; он не мог бы относиться ни к чему объективному и не был бы законом вообще.

Мы можем обобщить эти открытия, сказав, что все законы классической науки были векторными или тензорными законами. Они оставались ковариантными или неизменными по форме, когда мы изменяли ориентацию или форму нашей системы сеток, *сохраняя ее фиксированной в пространстве*. Этот последний момент важен, поскольку в классической науке время было абсолютным и отделенным от пространства, и законы оставались ковариантными исключительно с точки зрения пространственного изменения формы и ориентации нашей системы сеток.

Мы также можем упомянуть, что в дополнение к ковариантности всех законов природы по отношению к пространственному изменению системы сеток существовало второе требование, которому должны были подчиняться все законы природы. Мы имеем в виду проверку размерности. Краткое обсуждение прояснит этот момент.

Числовые значения всех физических величин зависят от нашего выбора стандартных единиц измерения расстояния, продолжительности и массы. Поэтому, если мы изменим наши единицы измерения, если мы примем минуту вместо секунды, или фут вместо метра, или фунт вместо килограмма, то числовые значения обеих сторон уравнения, представляющего закон, будут соответственно изменены. Чтобы уравнение оставалось верным, несмотря на изменение значений его двух членов, необходимо, чтобы изменение нашей единицы времени, длины или массы влияло на числовые значения обеих частей уравнения точно одинаково. Это условие выражается тем, что обе стороны уравнения должны иметь одинаковую размерность. Совершенно очевидно, что закон природы должен представлять собой уравнение такого типа. Было бы нелепо предполагать, что изменение наших единиц измерения с авердупойской системы на метрическую, например, , может когда-либо нарушить действие закона природы. Этот тест размерности часто был полезен при определении второй стороны уравнения, представляющей какой-либо неизвестный закон. Мы могли игнорировать точную форму второй стороны, но всегда могли заранее сказать, что ее размерность должна быть такой же, как и у первой стороны. Таким образом, часто получали определенное количество *априорной* информации.

ГЛАВА XXVII

ПРИНЦИП ОБЩЕЙ КОВАРИАНТНОСТИ ИЛИ ОБЩИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Мы постарались показать, что великое изменение в наших представлениях о мире, вызванное теорией относительности, проистекает из открытия того, что реальности соответствует четырехмерное пространство-время, а не трехмерное пространство и независимое время классической науки. Может показаться естественным обобщением распространить на пространство-время выводы, к которым мы пришли в последней главе при обсуждении ковариантности законов природы при изменении системы координат в пространстве. Тогда мы должны ожидать, что законы природы будут выражать отношения между векторами и тензорами в пространстве-времени, а значит, останутся ковариантными по отношению к изменению нашей системы координат пространства-времени.

Хотя это обобщение оказалось бы вполне законным, его достоверность ни в коем случае не является *априорно* очевидной. Мы можем принять его только после того, как убедимся, что законы физики, такие, какими их показали эксперименты, действительно можно рассматривать как выражение отношений между сущностями (векторами и тензорами) в пространстве-времени. Теперь, с чисто формальной точки зрения, можно предположить, что это может быть не так. Предположим, например, что четырехмерный пространственно-временной фон характеризуется некоторой конечной инвариантной скоростью C , превышающей постоянную Максвелла c , которая, как мы знаем, определяется скоростью света в вакууме. В расширенном смысле мы все еще могли бы рассматривать нашу вселенную как четырехмерное пространство-время, поскольку, поскольку инвариантная скорость конечна, а не бесконечна, слияние пространства и времени сохранилось бы, как и в пространстве-времени Минковского.

Но, с другой стороны, из-за несоответствия между C и c законы электромагнетизма перестали бы быть ковариантными по отношению к изменению галилеевой системы отсчета, а значит, и к изменению системы координат пространства-времени. И поэтому мы не могли бы рассматривать эти законы как выражение отношений между абсолютными сущностями фундаментального пространственно-временного континуума.

Ситуация меняется, когда в результате экспериментов мы обнаруживаем, что законы электромагнетизма остаются ковариантными по отношению к изменению галилеевой системы отсчета. Это открытие, конечно, является результатом отрицательных экспериментов в электромагнетизме и других экспериментов аналогичного характера. Первым следствием этого открытия является доказательство того, что C , инвариантная скорость пространства-времени, и c , постоянная Максвелла, должны быть одним и тем же, поскольку только при этом условии законы электромагнетизма останутся ковариантными.

Затем Эйнштейн распространил это свойство ковариантности на все физические законы. Таким образом, мы получаем специальный принцип относительности, согласно которому законы природы остаются ковариантными, когда мы относим их к той или иной галилеевой системе отсчета. Короче говоря, специальная теория относительности имеет дело исключительно с галилеевыми системами отсчета.

С точки зрения сеточных систем, напомним, что галилеевы системы координат задаются декартовыми сеточными системами в пространстве-времени, а различия в их ориентации представляют собой относительные скорости, существующие между системами координат. Когда мы переходим от измерений, выполненных в одной из этих декартовых сеточных систем, к измерениям, выполненным в другой из этих систем отсчета, мы должны применять преобразования, соответствующие вращению в пространстве-времени; и это преобразования Лоренца-Эйнштейна. Поэтому мы можем сказать, что в специальной теории принцип ковариантности влечет за собой ковариантность всех законов природы при подвергании их преобразованиям Лоренца-Эйнштейна.

Теперь тот факт, что законы природы сохраняют одинаковую форму независимо от ориентации нашей декартовой системы координат пространства-времени, или системы отсчета, предполагает, что они должны быть выражением отношений между такими сущностями, как векторы и тензоры в пространстве-времени. Если это так, то законы должны оставаться ковариантными не только при изменении декартовой системы координат, но и при изменении любого вида системы координат, будь то декартова или криволинейная. Другими словами, они должны быть выражены в виде векторных или тензорных уравнений в плоском пространстве-времени.

Это открытие позволяет нам продвинуться еще на шаг вперед. Допустим, что это некогда плоское пространство-время проявляет кривизну в определенных областях. Эйнштейн предположил, что в этом случае его кривизна будет искривлять вместе с ним и объекты, встроенные в его субстанцию. В этих условиях ковариантность законов природы должна сохраняться независимо от плоскости или кривизны пространства-времени, а значит, и от вида сетки, к которой мы можем обратиться. Именно это обобщение Эйнштейна составляет *принцип общей ковариантности*, или *общий принцип относительности*. Мы видим, что он представляет собой расширение специального принципа ковариантности, или относительности, распространяющегося на все области пространства-времени, будь то плоские или искривленные, и на все системы сеток, будь то декартовы или криволинейные, ковариантность, установленная изначально только в специальном случае. Отныне можно сказать, что все законы природы выражают отношения между сущностями пространства-времени (векторами и тензорами); в результате мы можем распространить на пространство-время выводы, к которым мы пришли при обсуждении пространства в предыдущей главе. После этого предварительного обсуждения мы можем исследовать объективность наших физических величин.

В классической науке эти величины должны были быть инвариантами, векторами или тензорами в пространстве. В свете новых открытий мы теперь должны заменить пространство пространством-временем. В результате и гравитационная сила, и потенциальная энергия оказываются лишенными всякого объективного значения, поскольку, просто изменив нашу систему координат в пространстве-времени, мы можем уничтожить или создать компоненты этих величин в одной точке. Поскольку потенциальная энергия входит в выражение закона сохранения, стало очевидным, что этот закон классической науки явно носит искусственный характер. Мы более подробно обсудим принципы сохранения в одной из следующих глав.

Теперь давайте рассмотрим тему общих законов природы. В классической науке эти законы должны были оставаться ковариантными по отношению к изменению формы и ориентации нашей системы координат в трехмерном пространстве. Новое требование заключается в том, что эти законы должны оставаться ковариантными по отношению к изменению формы и ориентации нашей системы координат в четырехмерном пространстве-времени. Это новое условие, очевидно, будет оказывать дополнительное

ограничивающее влияние на формулировку наших законов, поскольку оно включает в себя как частный случай все классические ограничения, касающиеся ковариантности в пространстве, дополняя их дополнительным ограничением ковариантности в пространстве-времени. Поэтому, когда мы рассматриваем законы классической науки, мы сможем принять их без изменений только в том случае, если они удовлетворяют ограничивающему условию, налагаемому теорией пространства-времени.

Однако следует иметь в виду, что тест тензора пространства-времени не может с уверенностью сказать нам, какими будут законы реального мира. Его действие сводится лишь к исключению; он говорит нам, какими эти законы никогда не могут быть. Когда дело доходит до решения, какой из многих возможных законов следует принять как истинный, мы должны руководствоваться экспериментом. Мы также можем предвидеть, что классические законы, хотя они и могут показаться невозможными в свете нового теста, тем не менее должны быть приблизительно верными, поскольку классическая наука считала их подтвержденными экспериментом. Поэтому не следует удивляться, что с практической точки зрения между новыми и старыми законами существуют очень небольшие различия, по крайней мере, если рассматривать грубые эксперименты. Но с теоретической точки зрения разница имеет огромное значение. Новые законы проходят испытание, а некоторые классические — нет.

Вскоре было отмечено, что классические уравнения электродинамики удовлетворяют новым теоретическим требованиям, поскольку их можно выразить в виде тензорных законов в пространстве-времени. Поскольку они полностью согласовывались с экспериментом, их оставили без изменений. С другой стороны, классические уравнения механики и, вместе с ними, закон всемирного тяготения Ньютона были, безусловно, неверными, поскольку они не оставались ковариантными при изменении нашей системы пространственно-временной сетки.

Соответственно, Эйнштейн без труда сформулировал правильные законы механики, слегка модифицировав классические, чтобы привести их в соответствие с ограничивающими условиями пространства-времени. Мы уже упоминали, что таким образом было доказано, что масса является относительной величиной, а не инвариантной, и ее значение варьируется в зависимости от нашей системы пространственно-временных сеток. Мы также упоминали, что самые строгие экспериментальные испытания доказали правильность новых законов и ошибочность классических.

В предыдущей главе мы указали, что классическая наука никогда не уделяла особого внимания тензорной нотации, поскольку трехмерное пространство считалось постоянно евклидовым и плоским, и, следовательно, стандартная система координат декартова типа была применима повсюду в пространстве. В специальной теории пространство-время также считается плоским, поэтому и здесь можно обойтись без тензорной символики. Мы видели, что специальная теория касалась только галилеевых наблюдателей в пространстве, удаленных от материи, и мы знаем, что наблюдатели этого типа всегда разделяют пространство-время на пространство и время с помощью декартовых сеток. Эти сетки отличаются друг от друга лишь своей различной ориентацией в пространстве-времени; и мы переходим от одной сетки к другой с помощью преобразований Лоренца-Эйнштейна.

С другой стороны, когда мы рассматриваем ускоренных наблюдателей, мы имеем дело с наблюдателями, которые разделяют пространство-время с помощью искривленных сеток. Опять же, когда присутствуют массы притягивающей материи, пространство-время приобретает внутреннюю кривизну, которая делает невозможным использование декартовых сеток. Некоторые конкретные наблюдатели, такие как те, которые свободно

падают в гравитационном поле, принимают системы координат, которые являются приблизительно декартовыми в непосредственной близости от наблюдателя; но если бы мы продлили эти системы координат достаточно, то вскоре обнаружили бы, что они стали криволинейными, а значит, изменялись по форме от места к месту из-за внутренней кривизны пространства-времени. Подобным образом, сеть параллелей и меридианов на поверхности сферы может быть ассимилирована декартовой системе равных квадратов только в окрестностях экватора, поскольку сетки сужаются по мере приближения к полюсам. Таким образом, в общем случае мы видим, почему, когда мы покидаем специальную теорию, где пространство-время плоское и где наблюдатель, будучи галилеевым, придерживается декартовых сеток, и когда мы исследуем общую теорию, где наблюдатель ускоряется или пространство-время искривляется, преобразования Лоренца-Эйнштейна должны уступить место более общему типу. В этих условиях тензорное исчисление становится мощным математическим инструментом.

Хотя верно, что в первые дни специальной теории Эйнштейн никогда не использовал эту форму исчисления, с которой он, вероятно, не был знаком, большинство современных трактатов по относительности обращаются к ней с самого начала, поскольку она выявляет прекрасное единство всей теории и показывает, что специальная теория является лишь частным предельным случаем общей. Это позволяет нам рассматривать обе формы теории одновременно. Мы подчеркиваем этот момент, потому что некоторые не математики-критики ошибочно полагают, что тензорное исчисление применимо только к общей теории. Из этого убеждения они выводят столь же ошибочное мнение, что эти две теории являются отдельными творениями, имеющими мало общего. Мы видели, что это не так.

В данной презентации теории Эйнштейна мы подчеркнули абсолютные характеристики пространства-времени, показав, как ковариация законов природы стала необходимым следствием, как только мы стали рассматривать их как выражение отношений между пространственно-временными сущностями (тензорами, векторами), выходящими за пределы системы координат наблюдателя. С этой точки зрения теория иногда называется «поиском абсолюта». Но мы должны помнить, что только в результате принципа относительности, вызванного, среди прочего, отрицательными экспериментами, пространство-время и законы природы могут рассматриваться в этом свете. Если бы не этот принцип, а значит, не тождество c , инвариантной скорости, и, постоянной Максвелла, то, хотя и мог бы существовать абсолютный четырехмерный мир, физические законы, какие мы их знаем, больше не могли бы рассматриваться как выражение отношений между его тензорами и векторами. Мы могли бы представить себе пространственно-временные сущности в этом новом типе пространства-времени как входящие в законы, которые оставались бы ковариантными по отношению к любому изменению системы сеток, но эти сущности и законы не были бы представлены физическими сущностями и законами, которые были обнаружены в ходе экспериментов. С точки зрения физика, они были бы просто вымыслом, чуждым миру нашего опыта. Это было бы так, как если бы сущности и законы, открытые нам опытом, отличались от законов, которые обычно ожидалось бы, если бы мир имел единство структуры и содержания. В этом случае великая красота теории пространства-времени Эйнштейна была бы утрачена, а вместе с ней и чудесное единство и гармония, которые, как она показала, существуют в природе. Таким образом, хотя в этой главе мы подчеркивали абсолютную точку зрения, мы должны помнить, что именно открытия теории относительности сделали возможной эту абсолютную точку зрения.

Кроме того, мы можем очень легко придать теории релятивистский аспект, если вспомним, что, выбирая криволинейные или гауссовы системы координат в пространстве-времени, мы просто ставим себя в положение ускоренного наблюдателя, который относит

свои измерения к некоторой системе отсчета, извиваясь как осьминог, и измеряет время событий с помощью безумных часов. Насколько можно понять, Эйнштейн изначально руководствовался желанием доказать, что все движения являются относительными; таким образом, при разработке теории релятивистская точка зрения предшествовала абсолютной. Нет причин удивляться этому приоритету, учитывая, что мы говорим о временах, когда пространство-время еще не было известно. Но когда пространство-время было открыто Минковским, теория получила дополнительный импульс (хотя мы хорошо понимаем, что даже до этого открытия теория, стремившаяся доказать, что определенные постоянные величины сохраняются независимо от движения наблюдателя, очевидно, привела бы нас к подозрению о наличии некоего абсолютного мира, в котором эти постоянные величины и находились бы). Этот абсолютный мир не мог быть миром отдельного пространства и времени, поскольку в абсолютном пространстве классической науки законы меняли свою форму при изменении нашего движения. Очевидно, что требовалось нечто большее, и ответом стало пространство-время.

Однако крайне важно не искажать значение ковариантности законов природы. Сам по себе факт, что все наблюдатели, независимо от их движения, обнаруживают одни и те же законы, не означает, что все наблюдатели одинаковы во всех отношениях. Даже в теории Эйнштейна вращающийся наблюдатель прекрасно понимает, что из-за центробежных сил он не находится в галилеевой системе отсчета. Полная относительность всех движений с любой точки зрения ни в коем случае не воплощена в ковариантности законов; и мы увидим, что эта полная относительность движения, ведущая к механике Маха, далеко не всеми учеными принимается. Обсуждение этой темы придется пока оставить в стороне, так как оно тесно связано со сложной проблемой формы Вселенной, о которой мы поговорим в одной из следующих глав.

ГЛАВА XXVIII

ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА ГРАВИТАЦИИ ЭЙНШТЕЙНА

В двух предыдущих главах мы очень общо обсудили тему тензоров и законов природы. Теперь осталось посмотреть, как Эйнштейн, руководствуясь требованиями, сопутствующими всем общим законам, сумел с математической точностью сформулировать истинный закон гравитации.

Чтобы понять то, что будет далее, мы должны вернуться к закону Ньютона. Этот закон определяет интенсивность и распределение поля гравитационной силы в пустом пространстве, окружающем материю. Кроме того, он позволяет нам в свою очередь определить, как поле силы будет распределяться внутри материи, например, внутри Земли. Таким образом, в своем наиболее общем аспекте закон гравитации Ньютона определяет интенсивность и распределение гравитационного поля как внутри, так и снаружи материи.

Теперь мы видим, что наличие поля силы означает существование неравномерного распределения потенциалов в пространстве, где существует поле,^[92] поскольку любое идеально равномерное и постоянное распределение потенциалов соответствовало бы полному исчезновению поля. Следовательно, закон всемирного тяготения Ньютона можно также записать как закон распределения потенциалов внутри и снаружи материи. В этой

$$\Delta\Phi = 4\pi k\mu.$$

форме он известен как уравнение Пуассона и записывается следующим образом

В этом знаменитом уравнении Φ представляет потенциал в каждой точке; $\Delta\Phi$ — сложное математическое выражение, связывающее потенциал в точке и его значение во всех соседних точках; μ выражает плотность в каждой точке вещества, создающего поле, а k — константа пропорциональности, известная как постоянная гравитации. А поскольку уравнение $\Delta\Phi = 4\pi k\mu$ дает нам закон распределения потенциала в каждой точке пространства, где плотность вещества равна μ , в областях вне вещества мы, очевидно,

$$\Delta\Phi = 0,$$

имеем

поскольку вне вещества μ , конечно, равно нулю. Выраженный в этой последней форме ($\Delta\Phi = 0$), в которой он дает нам распределение потенциала вне вещества, закон гравитации Ньютона известен как **уравнение Лапласа**.

Таким образом, мы можем сказать, что закон гравитации Ньютона внутри и вне материи задается формулой $\Delta\Phi = 4\pi k\mu$, в которой μ равно нулю или имеет некоторое определенное ненулевое значение в зависимости от того, рассматриваем ли мы область вне материи или внутри нее. Теперь это распределение потенциала в законе Ньютона относится к распределению в пространстве одного и того же потенциала, инварианта в пространстве, известного как **ньютоновский потенциал**. Но мы знаем, что если идеи Эйнштейна верны,

если гравитация должна быть отнесена к искривлению пространства-времени, то единственный потенциал Ньютона Φ (инвариант) должен быть заменен в каждой точке десятью отдельными g_{ik} пространства-времени. Как мы знаем, они больше не являются инвариантами, а являются тензорами второго порядка;⁽¹⁹³¹⁾ и инвариантный потенциал Ньютона Φ оказывается ни чем иным, как одним из g_{ik} , а именно временным, g_{44} .⁽¹⁹⁴¹⁾

Согласно взглядам Эйнштейна, выражение распределения гравитационного потенциала во внутренней части материи будет задаваться уравнением между некоторым сложным выражением, связывающим десять g_{ik} в каждой точке и в соседних точках, и некоторой величиной, представляющей характеристики материи в каждой точке. Это уравнение будет составлять закон гравитации Эйнштейна во внутренней части материи и будет представлять собой эйнштейновскую замену классическому уравнению Пуассона.

Уравнение Пуассона было уравнением между двумя инвариантами *в пространстве*. Закон Эйнштейна, с другой стороны, в соответствии с требованиями, которые должны удовлетворять все общие законы в теории пространства-времени, должен быть уравнением между инвариантами или тензорами в *пространстве-времени*. По аналогии с уравнением Пуассона мы видим, что левая часть закона Эйнштейна будет пространственно-временным инвариантом или тензором, который будет представлять распределение потенциала или распределение Эйнштейна-Пойссона (g_{ik}) от точки к точке, в то время как вторая часть будет задана инвариантом или тензором, представляющим материю.

Тензор, представляющий материю и полностью ее описывающий, уже был открыт Эйнштейном. Это был симметричный тензор второго порядка, обычно записываемый как T_{ik} , и его десять отдельных компонентов, относящихся к любой определенной системе пространственно-временных ячеек, определяли такие физические величины, как плотность материи в точке, ее внутренние напряжения, *vis viva* и импульс в этой системе ячеек. Материя, как источник гравитации, была, очевидно, гораздо более полно описана этим тензором, чем в классической науке, где простого упоминания ее плотности массы считалось достаточным для определения ее гравитационного поля. Таким образом, Эйнштейн обладал правой частью уравнения гравитации во внутренней материи, соответствующей $4\pi k \mu$ в уравнении Пуассона (без учета констант).

Оставалось обнаружить левую часть уравнения. В силу условия ковариантности эта левая часть должна была быть представлена тензором того же порядка и природы, что и правая часть, то есть в данном случае симметричным тензором второго порядка. Далее, она должна была быть построена из десяти потенциалов (g_{ik}), выражающих соотношение между этими десятью потенциалами (g_{ik}) в каждой точке и в соседних точках. Именно здесь открытия Римана соответствуют требованиям Эйнштейна, поскольку Риман и его последователи открыли тензоры, построенные из фундаментальных структурных тензоров континуума, а именно из тензоров (g_{ik}). Все эти тензоры служили для представления различных возможных типов структуры, геометрии или кривизны.

В предыдущей главе мы упоминали эти тензоры. Во-первых, это был тензор Римана-Кристоффеля B_{ikst} . Это был тензор четвертого порядка, как указывают четыре индекса под буквой B . Затем был симметричный тензор второго порядка G_{ik} . Наконец, был инвариант кривизны G , который уже не был тензором в обычном смысле этого слова. Дифференцируя и комбинируя эти величины, мы, конечно, могли бы получить и другие, но те, которые мы упомянули, являются самыми простыми.

У Эйнштейна был еще один подсказкой, которая помогла ему. Классическая наука предполагала, что на бесконечном расстоянии от притягивающей материи закон инерции будет действовать строго; то есть тело, движущееся свободно, будет следовать по прямолинейной траектории с постоянной скоростью по отношению к галилеевой системе отсчета. Выраженное на языке пространства-времени, это означало бы, что на бесконечном расстоянии от материи пространство-время станет строго плоским, как мы предполагали в специальной теории. Это условие требовало исчезновения тензора Римана-Кристоффеля B_{ikst} в бесконечности. Если это условие соблюдается, кривизна пространства-времени вокруг материи должна быть такого типа, который способен затухать до идеальной плоскости в бесконечности, вырождаясь в $B_{ikst} = 0$.

Закон кривизны $G_{ik} = 0$ был именно такого типа; поэтому Эйнштейн в своей первоначальной статье счел естественным выбрать тензор G_{ik} для левой части своих

$$G_{ik} = T_{ik} \text{ (neglecting constant factors).}$$

гравитационных уравнений. Соответственно, он написал:

Вне материи этот закон, конечно, сводится к $G_{ik} = 0$, поскольку вне материи T_{ik} , представляющий материю, исчезает. Легко видеть, что эти гравитационные уравнения удовлетворяют всем упомянутым нами требованиям. Во-первых, мы имеем ковариантные уравнения, поскольку G_{ik} и T_{ik} являются тензорами одной и той же природы и порядка. Во-вторых, G_{ik} построено из g_{ik} 's или потенциалов, как и должно быть. В-третьих, вне материи наши уравнения сводятся к $G_{ik} = 0$, и кривизна, подразумеваемая этим соотношением, совместима с существованием идеальной плоскости в бесконечности, т. е. с $B_{ikst} = 0$ в бесконечности.

Тем не менее, Эйнштейн вскоре понял, что его уравнения не могут соответствовать реальности. Дело в том, что материя, по-видимому, сохранялась в природе. Под этим мы подразумеваем, что материя исчезает отсюда, только чтобы появиться там.⁽¹⁹⁵¹⁾ Отсюда следовало, что тензор кривизны, который отождествлялся бы с присутствием материи в законе гравитации, должен был бы также обладать свойствами сохранения. Однако тензор не обладал такими свойствами; но очень похожий тензор, также симметричный и второго порядка, а именно

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G,$$

, удовлетворял всем вышеупомянутым требованиям. Отныне закон распределения потенциала, или гравитации внутри материи, должен был быть (пренебрегая постоянными коэффициентами)

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik}$$

(аналогично уравнению Пуассона); а вне материи, поскольку T_{ik} исчезло, осталось

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = 0$$

, что сводится к

$$G_{ik} = 0$$

(аналогично уравнению Лапласа). Из этого мы видим, что первоначальная ошибка Эйнштейна повлияла на закон искривления пространства-времени только внутри материи. Вне материи мы имели, как и раньше, $G_{ik} = 0$.^[96]

Напомним, что во всех примерах, где обсуждаются тензорные уравнения, индексы i и k (в данном случае) должны быть заменены всевозможными комбинациями целых чисел от 1 до 4 (поскольку пространство-время имеет четыре измерения). Уравнение такого вида, как

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik}$$

или

$$G_{ik} = 0$$

представляет собой десять отдельных уравнений. Фактически, если бы мы подставили все возможные комбинации, то получили бы шестнадцать уравнений; но поскольку тензоры симметричны, только десять из шестнадцати являются независимыми, поэтому их и нужно сохранить; остальные шесть являются простыми повторениями. Таким образом, мы видим, что в теории Эйнштейна для определения распределения гравитационного поля внутри и вокруг материи необходимо десять отдельных уравнений, тогда как в классической науке было достаточно одного уравнения, а именно уравнения Пуассона ($\Delta\Phi = 4\pi k\mu$).

Здесь можно упомянуть, что если мы откажемся от ограничения, согласно которому закон инерции строго соблюдается в бесконечности, то есть откажемся от условия идеальной плоскости в бесконечности, мы сможем построить другие тензоры Пуассона, удовлетворяющие всем остальным требованиям. Это можно сделать, добавив дополнительный тензор λg_{ik} (где λ представляет собой произвольную константу) в левую часть нашего уравнения. Наличие этого дополнительного члена будет означать, что даже для очень удаленных областей пространство-время все еще будет проявлять следы остаточной сферической кривизны, так что Вселенная будет замкнута на себе и конечна. В первоначальной разработке своей теории Эйнштейн отверг этот дополнительный член, но факт остается фактом: с точки зрения математических требований теории относительности нет никаких оснований исключать его *ab initio*. В любом случае, мы можем утверждать, что если член λg_{ik} вообще существует, то λ должен быть чрезвычайно мал, поскольку даже будучи конечной, Вселенная, безусловно, имеет гигантские размеры, и поэтому ее кривизна чрезвычайно мала. На данный момент мы будем игнорировать член λ , поскольку в любом случае его влияние будет слишком незначительным, чтобы заметно повлиять на такие явления, как движение планет. Только когда мы перейдем к рассмотрению формы Вселенной в целом и ее влияния на принцип Маха-Эйнштейна о относительности всех движений, наличие λg_{ik} приобретет огромное философское значение.

Методы, с помощью которых Эйнштейн пришел к открытию своего закона гравитации, могут показаться довольно фрагментарными, подобно сборке пазла, в котором структурные тензоры составляют части. Но само по себе это вряд ли можно считать недостатком теории. Скорее наоборот, поскольку это доказывает, что, так же как кусочки пазла можно сложить только определенным образом, так и Вселенная вряд ли может быть иной, чем она есть. В этом отношении существует заметный контраст между нынешней ситуацией и той, которая существовала в классической науке, где можно было ожидать практически любого закона гравитации.

Тем не менее, с точки зрения математической элегантности, требовалось нечто большее. Поэтому, когда Эйнштейн подготовил почву и его идеи стали более понятными, величайшие математики, такие как Клейн, Гильберт, Вейль, а впоследствии и сам Эйнштейн, взялись за открытие закона гравитации с помощью более общих методов. Они обнаружили, что если мы примем существование пространства-времени и согласимся с тем, что гравитационное поле вокруг материи обусловлено кривизной пространства-времени, то принцип стационарного действия показывает, что можно рассматривать большое количество законов гравитации. Однако, если было оговорено, что по аналогии с законом Ньютона закон кривизны не должен содержать производных потенциала (g_{ik}) или потенциалов более высокого порядка, чем второй, то закон гравитации Эйнштейна с или без члена потенциала (λg_{ik}) был единственно возможным. Кроме того, было обнаружено, что все эти возможные законы гравитации подтверждают математическое условие, выражающее закон сохранения материи; следовательно, действуя таким образом через принцип действия, можно было избежать довольно искусственного условия сохранения, которое в противном случае пришлось бы ввести в качестве дополнительной гипотезы.

ГЛАВА XXIX

ОБЩИЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

В классической науке, когда мы хотели описать движение тела, конечно, было недостаточно описать его пространственный путь в нашей системе отсчета. Необходимо было также определить его движение по этому пути. Однако, как только мы рассуждаем в терминах пространства-времени, а не в терминах отдельного пространства и времени, все особенности движения фиксируются единственной пространственно-временной траекторией тела. Это открывает возможность описать законы движения свободных тел чисто геометрическим способом в четырехмерном пространстве-времени, так что кинематика становится четырехмерной статикой. Перейдем теперь к более точному определению проблемы.

Согласно ньютоновской механике, свободные тела в межзвездном пространстве, удаленные от материи и движущиеся без каких-либо ограничений, всегда описывали прямолинейные траектории с постоянной скоростью. Этот закон был известен как закон инерции Ньютона. Мы, конечно, помним, что закон движения такого типа оставался совершенно неопределенным, пока мы не определили систему отсчета, к которой будет относиться это движение, и увидели, что любая галилеева система отсчета отвечает нашим требованиям. Теперь предполагалось, что закон инерции Ньютона был универсально действителен в случае свободных тел, движущихся без каких-либо ограничений; поэтому, когда было обнаружено, что закон не работает вблизи больших масс материи, расхождения были приписаны реальной силе гравитации, исходящей от материи и заставляющей бывшие свободные тела двигаться под ограничением. Другими словами, в поле гравитации тела больше не были свободными; таким образом, действие закона инерции, применимого к абсолютно свободным телам, не было опровергнуто. Движения, которые фактически совершали тела в гравитационном поле, были результатом компромисса между траекториями, по которым тела двигались бы в отсутствие гравитационного поля, и возмущающим влиянием поля. Эти законы движения были сформулированы в трех законах Кеплера о движении планет, согласно которым планеты описывают эллипсы вокруг Солнца (первый закон Кеплера) с переменными скоростями, определяемыми законом площадей (второй закон Кеплера) и размерами описываемых эллипсов (третий закон Кеплера).

Как и в случае с законом инерции, законы Кеплера о движении планет действовали только для галилеевой или инерциальной системы отсчета и, в частности, для галилеевой системы отсчета, привязанной к центру Солнца. Таким образом, существовала полная двойственность между двумя типами законов и движений: законами для свободных тел и законами для тел, движущихся под действием гравитационного поля.

В теории пространства-времени Эйнштейна эта двойственность устранена. Теперь существует только один закон движения, а именно: *все свободные тела движутся по геодезическим линиям, или самым прямым путям, через пространство-время, независимо от того, рассматриваем ли мы области вблизи материи или отдаленные области в межзвездном пространстве*. Этот закон полностью согласуется с *принципом наименьшего действия* и может рассматриваться как прямое следствие этого фундаментального принципа.^{[\(1971\)](#)}

Правда, из-за кривизны пространства-времени вокруг материи и его плоскости в отдаленных областях, фактические траектории и движения будут варьироваться в зависимости от большей или меньшей близости материи; и мы могли бы сказать, что нам удалось устранить двойственность в законах движения только путем введения новой двойственности, относящейся к структуре пространства-времени — искривленного вокруг материи и плоского для отдаленных областей. Но такая аргументация была бы неверной. Существует только один закон искривления пространства-времени или гравитации; этот закон, который приписывает пространству-времени определенное искривление в присутствии материи, также говорит нам о том, как это искривление исчезает, переходя в идеальную плоскость в бесконечности. Таким образом, существование плоского пространства-времени вдали от материи содержится в одном утверждении закона искривления пространства-времени или гравитации. Таким образом, точное определение движений тел, как вблизи материи, так и вдали от нее, дается одним законом искривления пространства-времени вместе с законом наименьшего действия, который гласит, что траектории пространства-времени или мировые линии тел будут геодезическими.

Рассмотрим теперь другой аспект вопроса. Мы видели, что согласно идеям Эйнштейна больше не было необходимости различать свободные тела (движущиеся в межзвездном пространстве) и тела, движущиеся под действием силы притяжения (движущиеся вблизи притягивающей материи). Отныне планета, движущаяся вокруг Солнца, является таким же свободным телом, как и тело, движущееся в межзвездном пространстве. Если она движется по-разному в этих двух случаях, то это просто потому, что структура пространства-времени искривлена вокруг материи, а не плоская, как в межзвездном пространстве. Таким образом, нет никаких оснований для привлечения физического притяжения или силы гравитации вблизи материи; это так называемое физическое притяжение не существует, пока планета движется без каких-либо дополнительных помех. Во всех случаях планеты и тела в межзвездном пространстве направляются через пространство-время внутренней структурой пространства-времени, в котором они находятся.

Структура подразумевает геометрию, а пространство-время, как и любое другое математическое расширение, *само по себе* аморфно; следовательно, эта структура пространства-времени () должна быть отнесена к внешней причине, к наличию четырехмерного метрического поля пространства-времени, подобного магнитному полю. Именно это четырехмерное поле действует как направляющее влияние на тела, сдерживая их вдоль геодезических линий пространства-времени. Следовательно, когда наблюдатель делит пространство-время на свою систему пространственных и временных сеток, направляющее поле направляет тела по определенным траекториям в пространстве и определяет их движения по этим траекториям. Если бы не было направляющего поля, или метрического поля, если бы пространство-время было полностью аморфным, не было бы разделения пространства и времени, движение было бы бессмысленным и невообразимым; даже если бы оно было вообразимым, тела не знали бы, как двигаться.

Поэтому, по-видимому, было бы более правильным утверждать, что не может существовать таких вещей, как свободно движущиеся тела, поскольку все тела подвержены влиянию направляющего поля. Однако мы можем сохранить обычную терминологию, помня, что под свободно движущимся телом мы понимаем тело, подверженное действию направляющего поля и ничему другому. Важно понимать, что в отношении свободы движения все тела в пустом пространстве, независимо от того, находятся ли они в гравитационном поле или далеко от материи, находятся в равных условиях. Во всех случаях их действия контролируются направляющим полем и только направляющим полем. Единственное различие заключается в том, что вблизи материи направление

направляющего поля слегка искривлено. Поэтому неправильно говорить о реальном физическом притяжении, действующем на тело, когда оно движется вблизи материи, и отрицать существование такого притяжения, когда тело движется в межзвездном пространстве.

И все же можно сказать: «Мы испытываем реальное физическое притяжение, когда стоим на Земле, тогда как мы не должны испытывать такого притяжения, если бы мы паряли в межзвездном пространстве». Давайте посмотрим, почему это реальное физическое притяжение, по-видимому, возникает в одном случае, а в другом — нет.

Как мы уже объясняли, свободно движущееся тело следует геодезической линии пространства-времени, независимо от того, искривлено ли пространство-время вследствие близости материи или является плоским. До тех пор, пока на тело не воздействуют, оно будет продолжать следовать своей геодезической линии, позволяя себе быть направляемым структурой или полем пространства-времени. Но предположим теперь, что на движение воздействуют, так что тело отрывается от геодезической линии, по которой оно обычно следовало бы. Направляющее поле немедленно отреагирует и противодействует этому постороннему воздействию. Это как если бы геодезическая линия была канавкой, из которой тело не могло бы легко отклониться.

Рассмотрим тело, движущееся равномерно в межзвездном пространстве в соответствии с законом инерции. Если мы помешаем движению этого тела, ускорим его по прямой линии или заставим описывать кривую, мы фактически отрываем его от его пространственно-временной геодезической линии. Направляющее поле отреагирует, и мы ощутим физическое притяжение, которое мы называем силой инерции или центробежной силой. Точно так же мы можем объяснить появление физического притяжения, которое мы приписываем гравитации, когда стоим на поверхности Земли.

Таким образом, тело, свободно падающее к Земле, движется по геодезической линии () в искривленном пространстве-времени, окружающем Землю. Но если по какой-то причине свободное падение тела прерывается, например, если жесткость земной коры не позволяет телу падать дальше по геодезической линии, геодезическая линия будет реагировать и стремиться протащить тело через земную кору. Именно эту силу мы ранее приписывали притяжению гравитации. Но мы снова видим, что эта сила имеет точно такое же происхождение, как и силы инерции, которые мы обсуждали ранее, так что между силой инерции и силой гравитации нет существенной разницы. Обе они являются реальными физическими силами в том смысле, что они производят физические эффекты; и обе они исчезнут точно таким же образом, когда мы перестанем мешать естественному движению тела. Короче говоря, обе они являются проявлениями четырехмерного метрического поля или направляющего поля пространства-времени.

ГЛАВА XXX

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ЭЙНШТЕЙНА

Закон Эйнштейна, как мы его сформулировали, является законом искривления пространства-времени вокруг материи и внутри материи. Это также закон распределения десяти потенциалов или « G_{ik} » по всему пространству-времени, или, опять же, закон распределения четырехмерного метрического поля или направляющего поля пространства-времени. Но для того, чтобы изучить последствия этого закона, мы можем рассмотреть его с еще одного ракурса.

Поскольку это закон искривления или структуры пространства-времени, мы можем вывести из него точное расположение геодезических линий пространства-времени вокруг материи. Эти геодезические линии, или пути наименьшего сопротивления, как мы помним, являются путями, по которым движутся планеты, лучи света и все свободные тела. Знание расположения геодезических линий вокруг Солнца позволит нам определить точные траектории в пространстве и точные движения по этим траекториям всех свободных тел, движущихся в гравитационном поле. При математическом анализе этих геодезических линий выясняется, что траектории и движения планет должны быть почти идентичны тем, которые требуются по закону Ньютона.

Однако между требованиями этих двух законов будут небольшие расхождения. В частности, закон гравитации Эйнштейна предсказывает, что траектории планет должны быть почти эллиптическими, но не совсем; должна быть небольшая прецессия перигелия планеты, величина которой увеличивается с увеличением скорости планеты на ее орбите. Самой быстро движущейся планетой Солнечной системы является Меркурий, и Леверрье почти столетие назад наблюдал, что перигелий Меркурия демонстрирует прецессионное движение, которое закон Ньютона не мог объяснить. Закон Эйнштейна объясняет это прецессионное движение не только качественно, но и количественно. Таким образом, была получена первая проверка закона Эйнштейна.

Здесь следует отметить, что в предыдущем примере любопытное движение Меркурия было уже известно астрономам. Но мы достаточно рассказали о методологии Эйнштейна в его открытии закона искривления пространства-времени, чтобы понять, что он не корректировал свой закон пространства-времени, чтобы объяснить до сих пор необъяснимое движение Меркурия. Мы видели, что закон гравитации, сформулированный им, был практически неизбежен, если принцип действия, наиболее фундаментальный столп науки, должен был сохраниться. Однако в следующей проверке мы увидим, что закон Эйнштейна смог предсказать существование явления, о котором классическая наука и не подозревала. Мы имеем в виду отклонение луча света в гравитационном поле.

Классическая наука всегда предполагала, что гравитационное поле, такое как поле Солнца, притягивает материальные тела, но не оказывает влияния на лучи света, которые считались невосприимчивыми к гравитационному притяжению. Если бы классическая наука была полностью убеждена в тождестве двух типов массы, она бы поняла, что световые волны должны обладать гравитационной массой, поскольку было известно, что они проявляют характеристики инерционной массы. Это инерционное свойство лучей света было теоретически предсказано Максвеллом и экспериментально доказано Лебедевым,

который обнаружил давление, оказываемое лучами света на тело, на которое они падают. Именно давление этого типа, как предполагается, ответственно за видимое отталкивание хвостов комет от Солнца. Поэтому было бы всего лишь шагом предположить, что лучи света должны проявлять гравитационную массу и, следовательно, должны притягиваться Солнцем.

Однако классическая наука никогда не считала оправданным такой шаг. В результате считалось, что лучи света будут проходить по прямой линии через гравитационное поле так же, как и через свободное пространство, удаленное от материи. Поэтому, когда первые наблюдения затмения, вызванные предсказаниями Эйнштейна, выявили неоспоримое искривление луча света, испускаемого звездой и скользящего по краю Солнца, классические ученые не сочли необходимым отказываться от закона Ньютона по этой причине. Они просто признали, что свет притягивается гравитационным полем, как и все другие формы материи, и расчеты показали, что, если предположить, что закон Ньютона верен, угол этого отклонения будет равен $0,87$ для луча, скользящего по краю Солнца. Первые наблюдения затмения проводились в очень неблагоприятных условиях, и все, что удалось установить, было то, что имело место некоторое искривление. Точную степень отклонения невозможно было определить каким-либо надежным способом, поэтому закон Ньютона по-прежнему имел своих защитников.

Перейдем теперь к критике Эйнштейна. Конечно, в теории Эйнштейна, даже до его открытия нового закона гравитации, луч света, безусловно, изгибался бы в гравитационном поле в силу постулата эквивалентности. Легко понять, как это происходит. Представим себе сундук, парящий вертикально в межзвездном пространстве, и луч света, проходящий через него горизонтально. Если теперь сундук ускорится вверх по вертикали, дно сундука будет двигаться с ускорением поперек луча, и в результате луч света будет проходить по кривой траектории через сундук. Но в этом случае постулат эквивалентности позволяет нам рассматривать сундук как неускоренный, но пронизанный гравитационным полем; поэтому мы можем сделать вывод, что луч света будет изгибаться вниз под действием этого поля. Следовательно, простое качественное искривление луча света в гравитационном поле Солнца не подтверждает закон гравитации Эйнштейна и не отменяет закон Ньютона; оно лишь доказывает правильность постулата эквивалентности и тождества двух видов масс. Именно точное количественное искривление луча, определяемое законом гравитации Эйнштейна, является решающим критерием правильности закона Эйнштейна. Это искривление, рассчитанное по геодезической линии, по которой проходит луч света, скользящий по краю Солнца, составляет $1,75''$, то есть в два раза больше, чем ньютоновское отклонение $0,87''$. Когда этот точный угол, предсказанный Эйнштейном, был наблюдаем во время последующего солнечного затмения 1919 года, интерес к теории относительности стал широко распространенным, поскольку наконец было признано, что эта теория не является просто математической мечтой.

Но даже этой проверки закона гравитации Эйнштейна было бы недостаточно для подтверждения теории. Как мы увидим в следующей главе, новый закон гравитации предполагал другие очень любопытные явления; и если бы эти новые явления не были в свою очередь проверены, теория, несмотря на ее замечательные достижения, должна была бы быть отвергнута.

ГЛАВА XXXI

РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ НА ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Мы должны помнить, что единственным фундаментальным континуумом мира является пространство-время; пространство и время, рассматриваемые отдельно, изменяющиеся в зависимости от движения наблюдателя, не имеют абсолютного значения. Закон кривизны, или гравитации, который мы обсуждали, является законом кривизны пространства-времени. Это закон, определяющий распределение четырехмерного метрического поля пространства-времени внутри материи и вокруг материи до бесконечности. Правда, мы можем осуществить некое разделение пространства-времени на пространство и время какого-то конкретного наблюдателя; и это может позволить нам представить закон кривизны пространства-времени как два отдельных закона кривизны, один из которых влияет на пространство, а другой — на время. Но по причинам, которые мы только что упомянули, никакого абсолютного значения нельзя придать кривизне, которую мы получим. Таким образом, в межзвездном пространстве наблюдатель, находящийся в галилеевой системе отсчета, утверждал бы, что ни пространство, ни время не проявляют никаких следов кривизны, в то время как наблюдатель, находящийся на краю вращающегося диска, признал бы, что и пространство, и время искривлены. С другой стороны, независимо от своей системы отсчета, любой из наблюдателей всегда признавал бы, что пространство-время не имеет никаких следов кривизны.

Именно потому, что пространство-время превосходит наблюдателя, его кривизна или плоскость, в зависимости от случая, могут считаться абсолютными; тогда как кривизна только пространства или только времени никогда не может представлять собой ничего, кроме простой связи между внутренним состоянием пространства-времени и движением или системой отсчета наблюдателя.

Конечно, если мы хотим разделить пространство-время на конкретные пространственные и временные направления какого-либо конкретного наблюдателя, мы всегда можем попытаться это сделать. Но в большинстве случаев эта процедура будет невозможна.

Если эти соображения правильно поняты, нет ничего плохого в попытке разделить искривленное пространство-время, которое существует вокруг Солнца, на пространство и время наблюдателя, находящегося в покое относительно Солнца и рассматривающего Солнечную систему в целом. Однако такое разделение возможно только в том случае, если массы движущихся планет можно игнорировать, так что единственное поле, которое мы должны учитывать, — это поле Солнца, остающееся неизменным с течением времени. Именно благодаря этому постоянному состоянию гравитационного поля возможно разделение на пространство и время. Поля этого типа называются **стационарными**. Для нестационарных полей, таких как те, где распределение поля изменяется со временем, разделение на пространство и время становится невыполнимым.

Поэтому мы будем предполагать, что гравитационное поле Солнца является стационарным, то есть что массы и движения планет не изменяют поле в значительной

степени. Затем мы можем приступить к разделению искривленного пространства-времени на пространство и время наблюдателя, находящегося в покое относительно Солнца и не вращающегося относительно звезд. Таким образом, мы разделим на два отдельных поля метрическое поле пространства-времени, то четырехмерное поле, которое не относится ни к пространству, ни ко времени. Таким образом, мы получим, во-первых, чисто пространственное метрическое поле, которое будет отвечать за измерения наших стержней, когда они находятся в покое в нашей системе отсчета; и, во-вторых, чисто временное метрическое поле (), которое будет определять поведение наших часов или колеблющихся атомов, когда они находятся в покое в различных областях пространства вокруг Солнца.

Когда Леви-Чивита и Шварцшильд провели это разделение, было обнаружено, что кривизна пространства наблюдателя вдоль плоского сечения через центр Солнца будет идентична кривизне поверхности параболоида вращения, расположенного вокруг Солнца; и что направление времени наблюдателя также будет искривлено определенным образом. Обе кривизны будут постепенно затухать для областей пространства, удаленных все дальше и дальше, до бесконечности. Однако мы не должны забывать, что это разделение и упомянутые нами кривизны действительны только для наблюдателя, находящегося в покое относительно Солнца, когда он наблюдает Солнечную систему в целом.

Преимущество этого разделения пространства-времени на пространство и время заключается в том, что оно позволяет нам выразить чисто формальные результаты, выведенные из гравитационных уравнений Эйнштейна, в терминах наших привычных представлений о пространстве и времени. Таким образом, становится возможным описать мировые линии планет по закону Эйнштейна, представляя их в виде пространственных орбит и движений по этим орбитам; следовательно, мы можем проверить предсказания Эйнштейна с помощью астрономических наблюдений. Кроме того, это разделение пространства-времени позволяет нам отдельно изучать те эффекты, которые должны быть отнесены к соответствующим кривизнам пространства и времени, рассматриваемым сами по себе и независимо друг от друга.

Сначала рассмотрим только кривизну времени. Допустим, что по какой-то причине кривизна пространства исчезла, и нам осталось бы иметь дело только с более или менее искривленным направлением времени. В этом случае окажется, что движения планет будут полностью соответствовать закону Ньютона. Прецессионное опережение перигелия Меркурия было бы отсутствовать, а изгиб луча света, скользящего по краю Солнца, был бы равен $0,87''$, как того требует закон Ньютона, а не в два раза больше, как того требует закон Эйнштейна. Из этого мы видим, что отличительной чертой закона гравитации Эйнштейна является дополнительная кривизна пространства вокруг Солнца (и вокруг материи в целом).

Здесь можно задать вопрос: «Поскольку особый тип искривления пространства-времени (искривленное время и плоское пространство) привел бы нас к закону Ньютона, почему Эйнштейн *априори* отверг классический закон и предложил вместо него свой собственный, более сложный тип искривления пространства-времени? Это не могло быть сделано с целью объяснить двойное искривление луча света, поскольку в то время этот эффект был неизвестен. Было ли это сделано с единственной целью объяснить движение планеты Меркурий?»

Ответ, безусловно, должен быть отрицательным. Когда Эйнштейн пришел к своему закону искривления пространства-времени $G_{ik} = 0$, он не мог заранее знать, что этот закон объяснит движение Меркурия. Возможно, он подозревал об этом, будучи убежденным, что находится на правильном пути, но чтобы установить природу движения планет,

подчиняющихся этому закону, необходимо было подвергнуть закон математической интеграции. Только после интегрирования было обнаружено, что движение Меркурия, как того требует закон, согласуется с предыдущими астрономическими наблюдениями. Следовательно, мы должны отбросить все идеи о законе, созданном с единственной целью согласования с движением планет.

Чтобы более полно понять подход Эйнштейна, мы должны вспомнить, что общий принцип ковариантности требует, чтобы все законы природы выражались в виде тензорных уравнений пространства-времени. Однако один только этот критерий не позволяет нам *априори* определить какой-либо конкретный закон искривления пространства-времени. Но Эйнштейн, как мы помним, вводит второе ограничение, согласно которому в пустом пространстве, окружающем материю, в закон кривизны должны входить только структурные тензоры пространства-времени, а именно тензоры Эйнштейна-Польмера (G_{ik}).^[98] Это второе ограничение является естественным, поскольку если бы в каждую точку пространства-времени вводились посторонние тензоры, пространство больше не могло бы быть пустым.

Если принять во внимание эти два ограничения, мы обнаружим, что закон $G_{ik} = 0$ является практически единственным, который можно сформулировать; в любом случае, он является самым простым. Теоретически можно было бы также принять закон $B_{ikst} = 0$, но этот закон, указывающий на идеальную плоскость, означал бы отсутствие гравитации. Тогда мы могли бы предложить закон $G_{ik} = \lambda g_{ik}$, который привел бы к конечной вселенной де Ситтера, возможность существования которой еще не была отвергнута.

Но в любом случае, с наложенными ограничениями, закон Ньютона исключается, так что, если мы не хотим вводить посторонние тензоры, действующие в качестве гипотез *ad hoc*, трудно понять, как можно избежать закона Эйнштейна.^[99] Если мы убедим себя в этом, то поймем, что совершенно невозможно думать, что мы можем регулировать кривизну пространства и времени по своему усмотрению. Эти кривизны заранее определяются законом кривизны пространства-времени, который сам по себе налагается соображениями рационального порядка.

Вернемся к нашему разделению искривленного пространства-времени на искривленное пространство и искривленное время. Мы видели, что если бы искривление пространства не существовало, а оставалось только искривление времени, то движения планет и свободных тел соответствовали бы закону Ньютона. Мы можем понять причину этого, следуя другой линии мышления.

Если пространство плоское, то потенциалы (g_{ik}), относящиеся к пространству, остаются постоянными (по крайней мере, в декартовой системе координат). Потенциал пространства ^[100] Единственный потенциал (g_{ik}), который может изменяться, — это потенциал времени (time one)⁹⁴⁴. Таким образом, этот последний потенциал является единственным, который может отвечать за поле силы. Из этого следует, что, считая пространство плоским, мы сохраняем только один из десяти потенциалов пространства-времени; и мы оказываемся в точно таком же положении, как и в законе Ньютона, где присутствовал только один потенциал, т. е. ньютоновский потенциал. Это позволяет нам отождествить временной потенциал⁹⁴⁴ с ньютоновским потенциалом Φ , и тем самым дается доказательство утверждения, которое мы сделали в предыдущей главе.^[101]

Теперь остается выяснить, как можно непосредственно обнаружить эту кривизну времени. Здесь мы должны напомнить, что кривизна времени выражает перераспределение

временного метрического поля, полученного путем разделения метрического поля пространства-времени на пространственное и временное. Перераспределение этого временного метрического поля в пространственно-временном разделении, которое мы обсуждаем, показывает, что его кривизна будет увеличиваться по мере того, как мы рассматриваем области пространства, все более и более приближающиеся к Солнцу, указывая тем самым на замедление времени по мере приближения к Солнцу. Именно это временное метрическое поле контролирует скорость эволюции любого изолированного периодического явления от места к месту, а значит, определяет практическую временную согласованность, задаваемую идеальными часами. Поэтому в данном случае действие этого поля будет заключаться в замедлении временной эволюции всех явлений, когда их пространственное положение становится все ближе и ближе к Солнцу. Этот эффект был предсказан Эйнштейном и известен как **эффект сдвига Эйнштейна**.

Конечно, если бы *мы*, как сознательные существа, находились в какой-либо конкретной точке гравитационного поля Солнца, мы никогда не заметили бы этого замедления времени и эволюции всех вещей в нашем непосредственном окружении, поскольку наше сознание участвовало бы в том же замедлении, которое происходило бы вокруг нас. Только когда мы наблюдали бы за отдаленными явлениями, происходящими в других частях гравитационного поля, стали бы очевидны различия в скорости их эволюции. Таким образом, хотя мы не должны непосредственно осознавать разные темпы старения в разных частях гравитационного поля, в конечном итоге мы должны обнаружить, либо посредством непосредственного наблюдения, либо при повторной встрече, что наш друг, живший вблизи Солнца, состарился меньше, чем мы, жившие дальше от его массы. Таким образом, гравитация сохраняет молодость, и, в более общем плане, два человека, живущие на двух разных звездах с неодинаковой массой, не будут стареть с одинаковой скоростью.

Следует отметить, что не сама сила гравитации ответственна за это замедление времени по мере приближения к Солнцу. Скорее это связано с уменьшением значения потенциала; и в данном случае мы видели, что единственный потенциал, который принимается во внимание, — это ⁹⁴⁴, или ньютоновский потенциал.

Все эти явления, предсказанные Эйнштейном, были совершенно новыми для науки, и было чрезвычайно важно проверить их правильность, прежде чем принять теорию Эйнштейна. Был предложен метод исследования поля гравитации с помощью вибрирующих атомов, которые, как предполагалось, ведут себя как идеальные часы, показывающие точное время. Например, если закон Эйнштейна об искривлении пространства-времени был правильным, атомы натрия, расположенные в разных частях солнечного поля, казались бы вибрирующими быстрее или медленнее, чем атомы в нашем непосредственном окружении, в зависимости от того, были ли они дальше или ближе к Солнцу, чем *мы*. Эти изменения в частоте колебаний атомов проявлялись бы физически в виде изменений цвета излучаемого или поглощаемого ими света. Из этого следовало бы, что в то время как атом натрия рядом с нами всегда излучал бы, по нашим оценкам, желтый свет, атомы, расположенные ближе к Солнцу, казались бы краснее, а атомы, расположенные дальше от Солнца, казались бы зеленее. В частности, атом натрия, находящийся в атмосфере Солнца, будет колебаться медленнее и казаться нам более красным, чем идентичный атом, исследуемый в нашей лаборатории (поскольку гравитационное поле Земли незначительно по сравнению с гравитационным полем Солнца).^[102]

В течение ряда лет существовали сомнения относительно того, действительно ли этот эффект существует, поскольку обнаружить столь незначительное смещение спектральных линий было очень сложно. Однако совсем недавно это явление было наблюждено на звезде огромной плотности, спутнике Сириуса.^[103] Это, пожалуй, самое красивое из всех

подтверждений теории Эйнштейна, поскольку рассматриваемый эффект был совершенно неожиданным для классической науки — даже в большей степени, чем искривление света в гравитационном поле.

Теперь постулат эквивалентности, приравнивающий гравитационные поля к полям инерции, требует, чтобы аналогичные явления происходили в ускоренном замкнутом пространстве (конечно, с учетом небольших расхождений в фактическом распределении поля, когда оно создается материей или ускорением). Таким образом, рассмотрим поезд, движущийся по галилееву, и два идентичных атома натрия или часы, размещенные соответственно на локомотиве и в последнем вагоне. До тех пор, пока движение поезда остается галилеевым, наблюдатель, находящийся в покое в любой точке поезда, не обнаружит никакой разницы в частоте колебаний атомов, [\(1104\)](#) и, следовательно, в цветах, которые они излучают. С другой стороны, если бы поезд ускорился, двигаясь все быстрее и быстрее, то теперь появилось бы поле инерционной силы, направленное от локомотива к заднему вагону; в результате атом в заднем вагоне казался бы наблюдателю в поезде вибрирующим медленнее, чем атом в локомотиве.

Поэтому мы должны понимать, что в то время как в специальной теории замедление времени всегда было связано с относительным движением, в данном случае замедление времени происходит несмотря на отсутствие относительного движения между атомами и наблюдателем в поезде. Точно так же в примере с эффектом Эйнштейна в гравитационном поле Солнца не было относительного движения, и тем не менее мы должны были принять замедление времени. Таким образом, мы видим, что ускорение, даже если оно не сопровождается относительным движением, приводит к изменению течения времени; и те же изменения произойдут и в случае расстояния.

Вместо того чтобы рассматривать ускоренную оболочку, движущуюся по прямолинейной траектории, мы, конечно, могли бы рассмотреть вращающуюся оболочку, и аргументация была бы такой же. Атомы, расположенные на большем расстоянии от центра вращения, казались бы вибрирующими все медленнее и медленнее; и, например, частица радия, помещенная на краю вращающегося диска, замедлила бы свою скорость распада, так что эффект инерционного поля привел бы к уменьшению радиоактивности атома.

Теперь, когда мы обсудили эффекты, вызванные кривизной времени, и увидели, что этот тип кривизны объясняет все основные эффекты гравитации, давайте рассмотрим дополнительные эффекты, вызванные кривизной пространства. Наличие этой кривизны пространства, по крайней мере в том, что касается движения тел, изменит эффекты, вызванные кривизной времени. Поэтому она будет ответственна за небольшие расхождения, которые отличают закон Эйнштейна от закона Ньютона. Однако до тех пор, пока движения тел в гравитационном поле невелики по сравнению с движением света, кривизна пространства не будет оказывать заметного влияния на их движения.

Среди планет только Меркурий движется со скоростью (относительно инерциальной системы отсчета Солнца), достаточной для того, чтобы сделать заметным влияние искривления пространства; и именно это влияние ответственно за небольшое прецессионное опережение перигелия Меркурия. В случае световых волн, которые движутся со скоростью, во много раз превышающей скорость Меркурия, влияние кривизны пространства будет еще более заметным. Оно вызовет увеличение изгиба луча света, равное тому, которое уже производится одной только кривизной времени, что, как мы знаем, соответствовало бы изгибу, требуемому законом Ньютона. Таким образом, объясняется двойной изгиб.

Чтобы исчерпать эту тему, мы должны упомянуть, что существует еще один случай, в котором кривизна пространства оказывает заметное влияние даже на медленно движущиеся тела. Это происходит в случае очень интенсивного гравитационного поля, во много раз превышающего поле Солнца. В таком поле даже медленно движущиеся тела заметно отклоняются от траектории, требуемой законом гравитации Ньютона.

Может показаться странным, что эта кривизна пространства, по сравнению с кривизной времени, кажется столь незначительной и дает наблюдаемые эффекты только для тел, движущихся с большой скоростью относительно Солнца. Однако решение этой загадки можно найти, если рассмотреть некоторые особенности пространственно-временного континуума относительности. В обычном континууме, таком как пространство, где все измерения имеют одинаковую природу, мы без труда можем определить единицу длины, которая будет одинаково применима к измерениям высоты, длины и ширины. Однако в пространстве-времени ситуация несколько иная, поскольку четвертое измерение (время) отличается от трех других. Таким образом, в то время как наши измерения по пространственным измерениям будут проводиться с помощью материальных стержней, для измерения времени потребуются временные стержни, или часы. Вопрос заключается в том, как мы должны координировать наши измерения с помощью часов и наши измерения с помощью стержней; или, другими словами, как мы сможем установить какое-либо сравнение величин между этими измерениями, столь разными по своей природе?

Ответ на этот вопрос заключается в том, что переменная, представляющая измерения по направлению времени, — это не t , а ct . Это означает, что одна секунда времени в наших формулах соответствует расстоянию, которое свет проходит за одну секунду, а именно 186 000 миль. Отсюда следует, что если мы измеряем время в секундах, то для согласования результатов мы должны измерять пространство в единицах длиной 186 000 миль.

Очевидно, что в реальной практике существует огромное несоответствие между величинами наших временных и пространственных единиц, поскольку подавляющее большинство тел, с которыми мы сталкиваемся, покрывают гораздо меньшее расстояние, чем единица пространства (186 000 миль) за единицу времени (одну секунду). Только в случае тел, приближающихся к скорости света в нашей системе отсчета, эти две прогрессии, пространственная и временная, в какой-то мере сопоставимы. Рассмотрим, например, нашу Землю. Она движется по отношению к Солнцу со скоростью около 18 миль в секунду, что эквивалентно примерно одной десяти тысячной части единицы пространства в единицу времени. Это подчеркивает тот факт, что по сути движения тел, которые нас интересуют, сводятся к движению во времени, а смещение в пространстве по сравнению с этим незначительно.

Теперь, когда мы приступаем к исследованию соответствующих эффектов кривизны времени и пространства, взятых по отдельности, в гравитационном поле Солнца, мы должны помнить, что для проявления кривизны мы должны исследовать относительно большие области на кривой поверхности (большие по сравнению с интенсивностью кривизны). Так, например, на кривой поверхности Земли, если мы ограничимся исследованием ограниченных областей, никаких эффектов ее кривизны не будет видно. Только когда мы проводим измерения на больших площадях, скажем, на нескольких сотнях миль, направление вертикали заметно изменится, и геодезические измерения покажут кривизну. То же самое происходит с кривизной пространства и времени в гравитационном поле. Только когда мы рассматриваем планеты, движущиеся через инерциальную систему отсчета Солнца со скоростью, приближающейся к скорости света (и, следовательно,

преодолевающие большие расстояния за единицу времени), искривление пространства будет производить эффекты, сопоставимые с эффектами, производимыми искривлением времени. Таким образом, мы понимаем, почему только кривизна времени способна производить основной эффект ньютоновского притяжения, такой как вес, в то время как эффекты, вызванные кривизной пространства, остаются незаметными, пока мы не рассмотрим движение Меркурия, который движется довольно быстро по отношению к инерциальной системе отсчета Солнца. Когда мы рассматриваем распространение лучей света, эффекты, вызванные кривизной пространства, в полной мере проявляют себя, и в результате двойное искривление луча света может быть в равной степени отнесено к кривизне времени и кривизне пространства.

Короче говоря, теперь мы понимаем, почему закон гравитации Эйнштейна заметно отличается по своим эффектам от закона Ньютона только тогда, когда мы рассматриваем тела, движущиеся со скоростями, приближающимися к скорости света. Мы снова понимаем, что если бы эта инвариантная скорость Вселенной была намного меньше, отклонения между законом гравитации Эйнштейна и законом Ньютона были бы гораздо легче обнаружить; и, наоборот, если бы инвариантная скорость была намного больше 186 000 миль в секунду, например, если бы она была бесконечной, между этими двумя законами не было бы никаких расхождений. Таким образом, мы снова приходим к тем же выводам, которые мы упоминали при обсуждении пространства-времени. Фундаментальное различие между теорией Эйнштейна и классической наукой возникает из-за открытия, что инвариантная скорость Вселенной конечна, а не бесконечна.

Мы можем обобщить все эти результаты, заявив, что основные эффекты гравитации производятся искривлением времени, *т. е.* временной компонентой метрического поля пространства-времени; искривление пространства оказывает ощутимое влияние только тогда, когда скорости движущихся тел очень велики или когда гравитационное поле имеет очень большую интенсивность. Следовательно, для слабых полей, таких как поле Солнца, и для медленных движений закон кривизны пространства-времени Эйнштейна приводит нас к результатам, практически идентичным результатам, вытекающим из закона гравитации Ньютона.

Теперь остается выяснить, как искривление пространства можно обнаружить прямым измерением, не прибегая к движущимся телам. Конечно, его можно обнаружить косвенно, поскольку мы видели, что оно ответственно за продвижение перигелия Меркурия и за двойное искривление луча света, проходящего вблизи Солнца. Но теперь мы предлагаем обнаружить его прямыми пространственными измерениями.

Мы сказали, что наше разделение пространства-времени на пространство и время эквивалентно разделению метрического поля пространства-времени на метрическое поле времени и метрическое поле пространства. Именно этим метрическим полем пространства мы сейчас и занимаемся. Этому метрическому полю пространства должна быть приписана структура нашего пространства (в данном случае искривленного). Если бы метрическое поле не существовало, пространство, конечно, не имело бы никакой структуры, никакой геометрии. Поскольку геометрия континуума раскрывается путем измерения, мы снова видим, что именно метрическое поле пространства будет контролировать поведение наших измерительных стержней, находящихся в покое в нашей системе отсчета, и, следовательно, будет определять практическую конгруэнтность.

Очевидным методом проверки предполагаемого расположения этого метрического поля пространства, или, что то же самое, этой кривизны пространства, было бы исследование пространства с помощью измерительных стержней; мы, конечно, должны были бы получить

неевклидовы результаты. Расчеты показывают, что результаты должны быть идентичны тем, которые были бы получены, если бы мы применили жесткие евклидовы стержни к соответствующему параболоиду вращения. Тип кривизны, или неевклидовости, подразумеваемый этим, относится к разновидности Римана, поскольку параболоид вращения является поверхностью с положительной кривизной. Следовательно, мы должны ожидать, что отношение окружности к ее диаметру будет меньше, когда какое-либо массивное тело, такое как Солнце, будет расположено в центре окружности.

Но и здесь мы сталкиваемся с той же трудностью. Чтобы обнаружить искривление такого рода, нам пришлось бы исследовать огромные области космоса, гораздо превышающие по размеру Солнечную систему; и вряд ли даже в будущем наши измерения станут достаточно точными, чтобы провести надлежащую проверку. Ситуация была бы иной, если бы Земля, к которой мы относим наши измерения, двигалась с большой скоростью через гравитационное поле Солнца. Например, жители планеты Меркурий были бы в гораздо более выгодном положении для проверки кривизны пространства путем прямых измерений, благодаря большей скорости их наблюдательного пункта через инерциальную систему отсчета Солнца. И снова мы видим, как получается, что конечная инвариантная скорость Вселенной, хотя и является наиболее важной с философской точки зрения, на практике теряет большую часть своего ощутимого влияния из-за своей невероятной величины. В результате, когда мы хотим проверить теорию Эйнштейна, всегда приходится прибегать к сверхточным экспериментам.

Кстати, теперь мы можем понять другое ошибочное утверждение, которое часто поддерживалось. Как только открытия Римана стали известны, была выдвинута возможность интерпретировать гравитацию с точки зрения кривизны пространства (в основном Клиффордом). Но большим препятствием для этой точки зрения было то, что самые точные пространственные измерения упорно отказывались показывать малейшие следы неевклидовости. Допустим, для целей аргументации, что было возможно интерпретировать кривые орбиты планет и снарядов с точки зрения направленного движения по кривым канавкам, проходящим через кривое пространство,⁽¹⁰⁵⁾ даже в этом случае, учитывая огромную степень неевклидовости, которую пришлось бы принять, эту схему пришлось бы отказаться; главная причина, конечно, заключалась в несовместимости этой гипотезы с евклидовостью, полученной в результате измерений с помощью жестких стержней. Только после того, как Минковский открыл пространство-время, модифицированная форма предчувствий Клиффорда могла быть оправдана; только тогда стало возможным примирить евклидовость наших пространственных измерений с той неевклидовостью пространства-времени, которая была источником всех гравитационных явлений. В этом отношении нельзя не подчеркнуть, что общая теория и специальная теория являются лишь двумя главами одной и той же теории. Поскольку общая теория не может работать без пространства-времени, любой эксперимент, который противоречил бы специальной теории, тем самым противоречил бы и общей теории.

Давайте теперь рассмотрим другой момент. Скорость света в гравитационном поле больше не является инвариантной, как это было в специальной теории. Однако, если бы мы измерили скорость света от точки к точке, перемещаясь от одной точки к другой, мы обнаружили бы, что где бы мы ни находились, эта скорость всегда будет одинаковой везде, благодаря прогрессивной модификации поведения наших стержней и часов. Только при наблюдении за удаленными точками мы могли бы распознать изменения в скорости света.

Таким образом, мы видим, что принцип неизменной скорости света верно только в свободном пространстве, удаленном от материи, и даже в этом случае только при расчете с

учетом нашей галилеевой системы отсчета. В ускоренной системе отсчета, как и вблизи материи, краеугольный камень специальной теории относительности больше не действует.

Отсюда следует, что в общей теории закон неизменной скорости света должен быть заменен более общим принципом, включающим принцип неизменной скорости как частный случай. Этот более общий принцип можно выразить так: луч света движется по линии мира (), которая является особым видом геодезической линии, называемой *нулевой линией* или *минимальной геодезической линией*. Это верно независимо от того, является ли пространство-время плоским или искривленным.

До сих пор мы изучали кривизну пространства и времени вне материи в тех особо простых стационарных случаях, когда возможно разделить пространство-время на отдельное пространство и время. В аналогичных условиях мы можем исследовать эти кривизны внутри материи. Рассмотрим однородную несжимаемую жидкость, находящуюся в покое в нашей галилеевой системе отсчета. Поскольку условия являются стационарными, то есть не изменяются со временем, мы снова можем разделить пространство-время на пространство и время и изучить два типа кривизны отдельно. Мы обнаруживаем, что направление времени искривлено, и эта кривизна снова связана с гравитационными силами, существующими внутри жидкости. Далее мы обнаруживаем, что трехмерное пространство внутри жидкости обладает кривизной в каждой точке, пропорциональной плотности жидкости в каждой точке. Предполагая, что эта плотность одинакова во всех точках, мы видим, что кривизна пространства постоянна, и получаем сферическое пространство трех измерений, аналогичное колпачку на двумерной поверхности обычной сферы в трехмерном евклидовом пространстве. Эта кривизна пространства внутри сферы не имеет ничего общего с размерами нашей жидкой сферы; кривизна определяется исключительно плотностью жидкости.

Теперь, в нашем обычном трехмерном евклидовом пространстве, когда задана кривизна или радиус сферы, ее общая площадь тем самым фиксируется. Аналогичным образом, плотность жидкости предопределяет кривизну пространства и, следовательно, фиксирует общий объем сферического пространства. Очевидно, что мы не сможем бесконечно увеличивать объем нашей жидкости, потому что наступит момент, когда в созданном ею самом сферическом пространстве не останется места для ее размещения. В случае жидкости с плотностью воды расчеты показывают, что когда сфера воды достигнет радиуса около 400 миллионов километров, будет невозможно увеличить ее размеры, добавив в нее еще воды. Когда этот критический объем будет достигнут, жидкость полностью заполнит сферическое пространство. Более того, расчеты показывают, что течение времени полностью остановится на поверхности жидкости, так что здесь у нас есть еще одна причина, которая не позволит сфере расти дальше. Возвращаясь к нашей двумерной аналогии, это будет похоже на то, как если бы вся поверхность двумерной сферы была занята водой.

На самом деле, этот критический объем никогда не мог бы быть достигнут, поскольку еще до его достижения давление в центре сферы стало бы бесконечным, и расчеты показывают, что это состояние также сопровождалось бы остановкой течения времени. В конечном итоге мы обнаруживаем, что максимально возможный объем, который могла бы

занять наша жидкая сфера, составил бы примерно $\sqrt{\frac{8}{9}}$ от упомянутого ранее объема.

Из этого следует, что жидкость никогда не сможет полностью заполнить сферический объем, созданный ее плотностью в пространстве. Используя двумерную аналогию, можно

сказать, что это было бы похоже на то, как если бы на поверхности обычной сферы нельзя было бы покрыть всю поверхность; всегда оставалась бы непокрытая часть, похожая на шапку. По этой причине иногда говорят, что пространство не может замкнуться на себе, поскольку часть сферического пространства, созданного жидкостью, никогда не может быть заполнена.

Так же как жидкость заданной плотности никогда не может увеличить свой объем сверх определенной точки, так и, наоборот, жидкость заданной массы никогда не может быть сжата до объема, который привел бы к увеличению ее плотности сверх определенного предела. Аргументация будет такой же. Давление стало бы бесконечным, время остановилось бы, и ничего больше не могло бы произойти. Сфера жидкости, обладающая той же общей массой, что и Земля, никогда не могла бы быть сжата до объема меньше, чем объем наперстка.

Указанные числовые значения показывают, что вероятность проверить эти предсказания теории экспериментально очень мала. Даже в случае гигантской звезды, такой как Бетельгейзе, ее плотность настолько мала, что критический объем намного превышает фактический размер звезды. Тем не менее, с теоретической точки зрения интересно отметить, что должен существовать определенный предел размера звезды с заданной плотностью. Если эти критические пределы когда-либо будут достигнуты, время остановится, и трудно предсказать, какими будут последствия. Эйнштейн назвал эти критические условия «катастрофами». Когда его попросили высказать свое мнение о том, что произойдет, если эти пределы когда-нибудь будут достигнуты, он, как говорят, ответил, что, скорее всего, мы станем свидетелями распада материи на излучаемую или электромагнитную энергию. Однако он предпочел не высказывать свое мнение, поскольку все, что он мог бы сказать, было бы не более чем догадкой.

ГЛАВА XXXII

ПРИНЦИПЫ СОХРАНЕНИЯ

Классическая наука предполагала, что масса тела является неизменной величиной, которая не изменяется при изменении относительного движения тела. Правда, высокоточные эксперименты с электронами, движущимися с огромными скоростями (эксперимент Бухерера), показали, что масса электрона увеличивается с увеличением его скорости, но предполагалось, что это увеличение массы обусловлено другими причинами, либо изменением электромагнитного поля электрона, либо, возможно, массой эфира, который электрон в своем быстром движении увлекает за собой.

Одним из первых триумфов специальной теории относительности было доказательство того, что масса, как и время и пространство, должна быть относительной, и что тело, движущееся относительно наблюдателя, подвергается увеличению массы, во всех отношениях идентичному тому, которое было обнаружено в эксперименте Бухерера. Это увеличение больше не могло быть отнесено к сопротивлению эфира, поскольку в специальной теории относительности следовало ожидать точно такого же увеличения, независимо от того, кто двигался через эфир — наблюдатель или электрон. Как и во всех предыдущих примерах, существенным фактором было относительное движение между наблюдателем и наблюдаемым. Эфир не играл никакой роли.

Затем расчеты показали, что масса тела станет бесконечной, когда скорость тела достигнет скорости света; по этой причине ни одно материальное тело не может двигаться быстрее света, поскольку для дальнейшего увеличения его скорости потребовалась бы бесконечная сила.

Когда Эйнштейн обнаружил это влияние относительной скорости на массу, было высказано предположение, что странное движение планеты Меркурий можно объяснить, не отказываясь от закона всемирного тяготения Ньютона, а просто принимая во внимание изменения массы этой быстро движущейся планеты в разное время года. Расчеты показали, что в этих условиях прецессия перигелия в орбите Меркурия действительно была бы возможна, но она была бы значительно меньше, чем наблюдаемая в действительности. Только когда общая теория заставила Эйнштейна отказаться от закона Ньютона, стало возможным точно объяснить движение Меркурия, как было объяснено в предыдущей главе.

С другой стороны, это изменение массы со скоростью вскоре привело к открытию очень важных явлений в области внутриатомных движений. Мы должны помнить, что атом — это миниатюрная солнечная система, в которой электроны вращаются вокруг центрального ядра, так же как планеты вращаются вокруг Солнца. Зоммерфельд, принимая во внимание релятивистскую вариацию массы со скоростью, доказал, что если концепция атома Бора верна, то спектральные линии, излучаемые раскаленным атомом, должны иметь характер пучков очень тонких линий, плотно сгруппированных вместе. Очень точные оптические испытания вскоре доказали, что эти предположения были верны; более тщательные исследования показали, что ранее наблюдавшиеся толстые спектральные линии были образованы множеством тонких линий, точно так, как и предсказывал Зоммерфельд. Это открытие имело двойной эффект. Оно подтвердило теорию Бора о структуре атома и в то же время поддержало специальную теорию относительности Эйнштейна.

Предоставив еще одно эмпирическое доказательство правильности взглядов Эйнштейна, эти эксперименты в сочетании с экспериментами Бухерера окончательно доказали, что масса тела является относительной, а не неизменной величиной, так что масса бильярдного шара, движущегося в нашей системе отсчета, должна считаться большей, чем его масса в состоянии покоя. Тем не менее, как показал Эйнштейн, все еще было возможно придерживаться классического представления о принципе сохранения массы, при условии, что под массой мы понимаем относительную массу, как она сформулирована сейчас, а не массу тела в состоянии покоя. Представьте, например, два бильярдных шара, сталкивающихся и затем отскакивающих в пространстве, определяемом нашей галилеевой системой отсчета. После отскока массы двух отдельных шаров изменятся, поскольку изменится их скорость по отношению к наблюдателю; но теория относительности доказывает, что сумма обеих масс останется одинаковой для всех галилеевых наблюдателей как до, так и после столкновения. Это и есть закон сохранения массы.

Если бы мы представили себе только один бильярдный шар, сначала находящийся в покое в нашей галилеевой системе отсчета, а затем движущийся, его масса, конечно, изменилась бы в соответствии с теорией относительности. Но следует понимать, что для того, чтобы привести тело в движение, мы должны подвергнуть его действию силы, то есть ввести постороннее воздействие, которое необходимо будет принимать во внимание.

Теперь это выражение массы тела, изменяющееся в зависимости от относительного движения тела, было доказано Эйнштейном как равное массе тела в состоянии покоя плюс некоторое математическое выражение, которое для низких скоростей становилось идентичным *vis viva*, или классической энергии движения, тела в нашей системе отсчета. Соответственно, энергия движения тела могла рассматриваться как идентичная увеличению его массы в движении по сравнению с его массой в покое. Таким образом, по ряду причин стало весьма вероятным, что то, что мы называли массой тела в покое, само по себе было обусловлено содержащейся в теле энергией. Поэтому, в общем случае, тело при нагревании, электризации или сжатии увеличивало бы свою массу.

Это отождествление массы тела в покое с содержащейся в нем энергией, а также его массы в движении с содержащейся в нем энергией плюс его обобщенной *vis viva*, или энергией движения, позволяет нам утверждать, что принцип сохранения массы является ни чем иным, как принципом сохранения энергии. Следовательно, специальная теория Эйнштейна также согласуется с последним принципом. Аналогичным образом, принцип сохранения импульса, или закон действия и противодействия Ньютона, оказался бы в полной гармонии со специальной теорией Эйнштейна, если бы под импульсом мы понимали относительную массу, умноженную на скорость, а не массу в покое, умноженную на скорость.

Короче говоря, принципы сохранения оставались в силе только тогда, когда мы расширяли наше понимание массы, импульса и энергии; и ньютонова механика должна была быть изменена в результате открытий Эйнштейна в специальной теории относительности.

Давайте теперь изучим проблемы сохранения в общей теории, когда мы используем не только галилееву систему отсчета, но и любую другую систему, то есть когда наше пространство пронизывается полем инерционных сил или, опять же, полем гравитации. Мы снова обнаружим, что сохранение требуется общей теорией; хотя, как мы увидим, это будет не тот тип сохранения, к которому мы привыкли в классической науке.

Чтобы прояснить эти моменты, мы должны вернуться к закону гравитации Эйнштейна. Мы помним, что, предполагая правильность взглядов Эйнштейна на гравитацию как на

следствие искривления пространства-времени, принцип стационарного действия привел

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik}.$$

нас к закону гравитации:

Теперь тензор слева обладает замечательным математическим свойством выражать форму кривизны, которая сохраняется независимо от нашей системы координат. Отсюда следует, что в силу приведенных выше уравнений гравитации, то же самое сохранение должно действовать для T_{ik} , а значит, для массы, энергии и импульса.

Следует отметить, что математическое тождество, выражающее это свойство, не зависит от теории Эйнштейна; это чисто математическое свойство между G_{ik} континуума, которое было открыто математиком Риччи до появления теории относительности. Но с учетом физических отношений, которые Эйнштейн установил между кривизной пространственно-временного континуума и наличием материи, теперь из теории следовало, что правая часть гравитационных уравнений должна иметь те же характеристики сохранения, что и левая часть. Если мы интерпретируем этот результат с физической точки зрения, то видим, что он подразумевает сохранение массы, импульса и энергии.

Таким образом, мы приходим к замечательному выводу, что принципы сохранения, которые в классической науке носили эмпирический характер и были совершенно не связаны с законом гравитации, теперь представляются непосредственными и необходимыми следствиями закона гравитации Эйнштейна. Другими словами, если признать правильность закона гравитации, то закон сохранения не может не существовать в этой вселенной. Для многих мыслителей это один из самых прекрасных аспектов теории Эйнштейна, демонстрирующий удивительное единство и взаимосвязь природы.

Тем не менее, мы должны быть осторожны, чтобы понять более глубокое значение сохранения в теории относительности. Мы увидим, что тип сохранения, который мы сейчас обсуждаем, несколько отличается от классической концепции сохранения, согласно которой, например, материя исчезала отсюда, чтобы появиться там. В данном случае сохранение более эфирное и абстрактное. Мы можем лучше объяснить эти моменты, рассмотрев закон сохранения в классической науке. Здесь, при наличии силовых полей, принципы сохранения энергии и импульса на первый взгляд кажутся противоречащими эксперименту. Так, о теле, свободно падающем к земле, нельзя сказать, что оно обладает постоянной *vis viva*, или энергией, поскольку, изначально находясь в состоянии покоя, оно приобретает все большую скорость по мере падения к земле. Вместо того чтобы признать нарушение принципа сохранения энергии, классическая наука предпочла предположить, что тело обладает двумя типами энергии: кинетической энергией, определяемой формулой $\frac{1}{2}mv^2$, и потенциальной энергией, зависящей от положения тела в поле гравитации. Именно сумма этих двух типов энергии оставалась постоянной и, следовательно, сохранялась во время падения тела.

Следует отметить, что необходимость введения потенциальной энергии в качестве дополнительного требования для обеспечения сохранения существует только в том случае, если мы рассматриваем явление, происходящее в гравитационном поле или в инерционном

поле силы, которое было бы присутствовать, если бы мы стояли в ускоренной системе отсчета. В отсутствие такого поля потенциальная энергия стала бы совершенно бессмысленной, и сохранение энергии сохранилось бы без нее.

Если теперь мы примем во внимание открытия Эйнштейна в специальной теории, где масса отождествляется с энергией, то увидим, что в общем случае наличия гравитационного или инерционного поля сохранение как массы, так и энергии может быть поддержано, но только при условии, что мы введем понятие потенциальной энергии. Остается выяснить, имеет ли потенциальная энергия какое-либо внутреннее значение в мире или же она представляет собой простой математический прием (), введенный с целью сохранения принципов сохранения. Общая теория доказывает, что последний вариант является правильным и что сохранение в классическом смысле должно быть отвергнуто. Причина заключается в том, что когда мы выражаем это пространственно-временное уравнение сохранения в полудекартовой сетке пространства и времени (строго декартова сетка невозможна из-за внутренней кривизны пространства-времени вокруг материи), мы обнаруживаем, что оно выражает истинное сохранение в пространстве и времени в смысле специальной теории без добавления потенциальной энергии; но когда мы выбираем произвольную криволинейную сетку пространства и времени, математическое выражение, которое мы изучаем, разбивается на два члена, и сохранение этого выражения, следовательно, подразумевает сохранение суммы этих двух членов. Первый член относится к массе, *вис-вива* и импульсу материи, а второй член относится к энергии и импульсу гравитационного или инерционного поля. Таким образом, кажется, что сохранение может быть поддержано, если мы расширим его, чтобы включить энергию и импульс гравитационного поля (), а также энергию и импульс материи. Это, действительно, было первоначальной позицией Эйнштейна. Позже он, по-видимому, отказался от нее по следующим причинам:

Второй член, представляющий гравитационную или потенциальную энергию в наших уравнениях сохранения, задается математическим выражением, которое не является тензором. Поэтому он выражает лишь соотношение между движением наблюдателя и структурой пространства-времени; он не описывает структуру абсолютного пространства-времени как такового. Мы должны понимать, что потенциальная энергия не представляет собой ничего, присущего абсолютному миру, и мы должны исключить ее как фундаментальную величину при формулировании наших законов.

Однако, как только мы отказываемся принимать во внимание гравитационную или потенциальную энергию, закон сохранения перестает действовать в поле силы. Отсюда следует, что закон сохранения массы, энергии и импульса действует только для галилеевых наблюдателей. Таким образом, закон сохранения не является истинным законом природы, действительным для всех наблюдателей. В свете этих открытий постоянство массы и материи больше не может быть поддержано. Принцип сохранения массы Лавуазье должен быть отвергнут, а концепция материи как вещества оказалась фундаментально неверной.

Но если отбросить обычные законы сохранения, чем же их заменить? Очевидно, что теперь они уступят место более общему принципу релятивистского сохранения, своего рода принципу пространства-времени. Этот тип сохранения в общем случае не может быть выражен в терминах сохранения наших привычных физических величин в пространстве и времени. Его значение будет более глубоким, поскольку оно будет относиться к пространственно-временным однородностям, существующим в абсолютном мире пространства-времени.

Только когда наблюдатель принимает галилееву или полугалилееву систему отсчета, физическое сохранение будет сохраняться; только тогда человек сможет представить себе вселенную постоянных пространственных сущностей. Как отмечает Эддингтон, только при использовании этих декартовых или полудекартовых сеточных систем разделение пространства-времени на четыре направления дает привычное для человека пространство и время. Таким образом, между естественным разделением времени и пространства нашим сознанием и настойчивым стремлением ума искать постоянное, а не преходящее, чтобы построить здание знания, по-видимому, существует связь.

ГЛАВА XXXIII

ДРУГИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ

Мы помним, что в классической науке закон всемирного тяготения Ньютона выражался

$$\Delta\Phi = 4\pi k\mu,$$

уравнением Пуассона,

где μ представляло плотность материи, возбуждающей поле в каждой точке пространства. Отсюда следовало, что только масса тела была активной в создании гравитационного поля. Точно так же масса тела была единственной причиной его притяжения в гравитационном поле, так что вес тела в данной точке около Земли был полностью определен, когда мы знали массу тела и массу Земли.

Теперь, в теории Эйнштейна, гравитационные уравнения принимают вид

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik},$$

где G_{ik} и G относятся к кривизне пространства-времени или, если предпочесть, к потенциалу или распределению g_{ik} , а T_{ik} представляет характеристики материи, возбуждающей поле. Существует десять таких гравитационных уравнений, соответствующих различным значениям от 1 до 4, которые мы должны присвоить индексам i и k (пространство-время является четырехмерным). И здесь мы должны отметить, что тензор T_{ik} представляет материю гораздо полнее, чем μ классической науки, поскольку различные компоненты T_{ik} относятся к таким дополнительным характеристикам, как импульс, *vis viva* и условия напряжения, существующие внутри материи. Таким образом, мы можем сделать вывод, что в то время как в классической науке масса материи была единственной причиной создания гравитационного поля, в данном случае все вышеупомянутые дополнительные характеристики вносят свой вклад.

Аналогичные соображения применимы к гравитационному полю вне материи, и в результате, если бы Солнце вращалось с большей скоростью вокруг своей оси, создаваемое им гравитационное поле было бы несколько иным. В случае планеты Юпитер и ее спутников, по-видимому, можно было бы подвергнуть наблюдательной проверке это дополнительное возмущение, вызванное вращением центральной массы на движущихся вокруг нее спутниках. Однако пока что проверить эту теорию в этом отношении не удалось.

До сих пор мы рассматривали гравитационное поле, или искривление пространства-времени, создаваемое материей, но должно быть очевидно, что благодаря отождествлению массы и энергии () искривление пространства-времени является необходимым следствием наличия энергии. Таким образом, электромагнитное поле должно быть способно вызывать гравитационное поле. Вкратце, мы можем представить проблему следующим образом:

Минковский и Эйнштейн успешно доказали, что электрические и магнитные силы являются компонентами одного и того же тензора F_{ik} . На основе этого тензора можно было

построить другой тензор E_{ik} , представляющий энергию и характеристики электромагнитного поля, так же как T_{ik} представлял энергию и характеристики материи. Эти два типа энергии, которые не являются идентичными, обозначаются как *свободная энергия* и *связанная энергия*, соответственно. Если теперь мы хотим обнаружить точный тип искривления пространства-времени, или гравитационного поля, которое создает электромагнитное поле, нам нужно всего лишь заменить T_{ik} на E_{ik} в гравитационных

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = E_{ik}.$$

уравнениях. Таким образом, мы получаем

С первого взгляда видно, что тип кривизны, создаваемый электромагнитным полем, должен отличаться от кривизны, создаваемой материей, поскольку E_{ik} и T_{ik} являются разными величинами. Более заметная разница проявляется, когда мы манипулируем гравитационными уравнениями в соответствии с допустимыми математическими правилами. Тогда мы обнаруживаем, что в то время как гравитационные уравнения для материи дают

$$G = -T,$$

где T представляет плотность массы материи, то гравитационные уравнения для электромагнитных полей дают

$$G = -E = 0,$$

для E оказывается величиной, которая исчезает во всех электромагнитных полях. Следовательно, мы понимаем, что в областях пространства, где присутствуют электромагнитные поля, но отсутствует всякая материя, гауссова кривизна G пространства-времени всегда исчезает; тогда как в областях, занятых материей, она равна плотности материи и не исчезает.

Прежде чем приступить к сравнению этих различных типов кривизны, напомним, что существует три типа тензоров кривизны, имеющих особое значение: тензор Римана-Кристоффеля B_{ikst} , сжатый тензор G_{ik} и инвариант G . Если мы запишем эти три величины в строке: G, G_{ik}, B_{ikst} , то обнаружим, что исчезновение B_{ikst} в области означает полную плоскость континуума в этой области. В результате, как G_{ik} , так и G обязательно исчезнут везде в пределах области. Если исчезает G_{ik} , то G автоматически исчезнет, но B_{ikst} не обязательно исчезнет. Следовательно, $G_{ik} = 0$, хотя и включает в себя идеальную плоскость как крайний случай, допускает определенную степень кривизны. Наконец, если исчезает G , то G_{ik} не обязательно исчезает; и если G_{ik} не исчезает, то B_{ikst} тоже не исчезает; тогда как если исчезает G_{ik} , мы возвращаемся к предыдущему случаю, т. е. B_{ikst} может исчезнуть или не исчезнуть. Следовательно, $G = 0$, хотя и совместимо с идеальной плоскостью как частным случаем, подразумевает закон кривизны, еще менее строгий, чем $G_{ik} = 0$.

Теперь мы можем сравнить различные типы искривления пространства-времени, создаваемые материей и электромагнитной энергией. Записывая гравитационные уравнения немного иначе, но эквивалентным образом, мы получаем внутри материи

$$G_{ik} = T_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}T,$$

откуда

$$G = -T.$$

Таким образом, внутри материи ни одна из кривизн не должна исчезать, и, следовательно, на кривизну пространства-времени не налагается никаких ограничений.

В областях, где есть электромагнитные поля, но нет материи, мы имеем

$$G_{ik} = E_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}E = E_{ik} \text{ (since } E \text{ always vanishes),}$$

откуда

$$G = -E = 0 \text{ (since } E \text{ always vanishes).}$$

Таким образом, кривизна менее выражена, поскольку G исчезает.

В областях вне материи, где нет электромагнитных полей, кривизна еще менее выражена, поскольку там

$$G_{ik} = 0.$$

$B_{ikst},$

однако исчезает только для точек, бесконечно удаленных от материи (в гипотезе бесконечной вселенной).

В абсолютно свободном пространстве, удаленном от материи и где нет электромагнитной энергии, все тензоры и инварианты исчезают.

Таким образом, мы обнаруживаем, что существует прогрессирующая кривизна пространства-времени по мере перехода от пустого пространства-времени, удаленного от всякой материи и энергии, к пустому пространству-времени вблизи материи, затем к областям, где есть электромагнитные поля, но нет материи, и, наконец, к областям, заполненным материей или электронами. Если мы рассматриваем последовательные градации кривизны пространства-времени как соответствующие последовательным ступеням материализации, начиная с пустоты, то мы должны поместить электромагнитные поля, или свободную энергию, на стадии материализации, предшествующей стадии собственно материи, или связанной энергии.

Еще одно открытие, которое Эйнштейн смог сделать на основе своих гравитационных уравнений, касается распространения гравитационной силы. Классическая наука придерживалась мнения, что гравитация должна распространяться со скоростью, намного превышающей скорость света, возможно, даже с бесконечной скоростью. Но Эйнштейн, интегрируя уравнения гравитации, доказал, что в слабом поле гравитационные волны

будут распространяться со скоростью света. В сильном поле, конечно, само наличие поля будет влиять на скорость распространения волн, и проблема станет гораздо более сложной.

ГЛАВА XXXIV

КОНЕЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

В классической науке пространство, фундаментальное континуум, считалось евклидовым и плоским по всей своей протяженности, а значит, бесконечным. Однако как только Эйнштейн пришел к выводу, что фундаментальное пространственно-временное континуум Вселенной не является строго плоским, а проявляет различные степени кривизны в разных местах вокруг материи, необходимо было более тщательно исследовать возможность его скручивания вокруг себя и, следовательно, конечности, прежде чем можно было высказать какое-либо определенное мнение. Правда, это фундаментальное континуум больше не было трехмерным пространством; оно было четырехмерным пространством-временем. Но, помимо этого различия, все еще оставалась та же основная проблема, и мы могли задать вопрос: «Вселенная пространства-времени бесконечна или конечна?»

Точнее, если мы обратимся к двумерной аналогии, должны ли мы рассматривать вселенную пространства-времени как локально искривленную вокруг отдельных масс вселенной, но в целом плоскую или квазиивклидову на бесконечной площади, подобно ряби на поверхности бесконечного водоема? Или мы должны предположить, что рябь на поверхности воды больше похожа на рябь на поверхности жидкой сферы, замкнутой на себе?

Теперь, если мы рассмотрим теорию в ее нынешнем состоянии, мы должны согласиться с тем, что конечная вселенная исключена. Мы можем понять этот момент, рассмотрев закон гравитации, который в теории Эйнштейна также является законом искривления пространства-времени. Мы помним, что уравнения гравитации были даны следующим

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik},$$

образом

где G представляли искривления пространства-времени в точке, а T_{ik} представляли характеристики материи в той же точке. Вне материи T_{ik} исчезали, и гравитационные уравнения сводились к

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = 0,$$

или, что то же самое, к

$$G_{ik} = 0,$$

последнее уравнение совместимо с идеальной плоскостью пространства-времени ($B_{ikst} = 0$). Эйнштейн предположил, что это условие идеальной плоскости существует в бесконечности, и именно при учете этого дополнительного условия закон Эйнштейна о

гравитации стал определенным. Именно этот закон позволил ему предсказать двойное искривление луча света, эффект Эйнштейна, а также объяснить любопытное движение планеты Меркурий.

Очевидно, что закон гравитации, который предполагает существование идеально плоского пространства-времени в бесконечности, обязательно приводит к незамкнутой пространственно-временной вселенной; и поэтому мы видим, что с исходными гравитационными уравнениями Эйнштейна конечная замкнутая вселенная не может существовать. Таким образом, мы приходим к выводу, что для реализации конечной вселенной необходимо модифицировать эти уравнения.

Ранее, обсуждая закон гравитации, мы упомянули, что включение дополнительного тензора λg_{ik} (λ — любая произвольная константа) в уравнение кривизны не разрушит тензорную природу закона; следовательно, с точки зрения требований всех общих законов, этот модифицированный закон кривизны пространства-времени является приемлемым. Если его принять, то вселенная больше не может быть квазиевклидовой и бесконечной; она должна быть замкнутой, а значит, конечной. Чтобы понять причину этого утверждения, мы должны рассмотреть закон кривизны с включением члена λ . Удобно будет записать этот

член в виде: $-\frac{\lambda}{2}g_{ik}$; и в этом случае закон кривизны пространства-времени внутри материи принимает вид

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G - \frac{1}{2}\lambda g_{ik} = T_{ik}.$$

Вне материи мы получаем

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G - \frac{1}{2}\lambda g_{ik} = 0$$

или его эквивалент,

$$G_{ik} = -\frac{\lambda}{2}g_{ik}.$$

Таким образом, включение члена λ изменяет закон кривизны пространства-времени вне материи с $G_{ik} = 0$ на $G_{ik} = -\frac{\lambda}{2}g_{ik}$. Теперь этот новый закон кривизны больше не

$$B_{ikst} = \frac{\lambda}{6}(g_{is}g_{kt} - g_{ik}g_{st}),$$

совместим с идеальной плоскостью ($B_{ikst} = 0$), но с

что дает замкнутое сферическое пространственно-временное расширение. Таким образом, мы получаем четырехмерное сферическое пространство-время Римана как возможную модель Вселенной. Из этих уравнений мы также можем вывести $G = -2\lambda$, что показывает нам, что λ пропорционально кривизне Вселенной.

Поскольку в любом случае Вселенная, будь она конечной или бесконечной, имеет огромные размеры, ее кривизна должна быть практически незначительной. Таким образом, мы можем сделать вывод, что λ , если оно вообще существует, несомненно, является небольшой, очень небольшой величиной; поэтому в задачах, связанных, например, с динамикой Солнечной системы, мы можем по-прежнему игнорировать его существование. Теоретически, конечно, такое игнорирование было бы неоправданным, поскольку наличие члена λ , изменяя закон кривизны, неизбежно изменит расположение геодезических линий пространства-времени. В результате, орбиты и движения планет вокруг Солнца должны быть затронуты его существованием, и должно быть возможно решить вопрос о его наличии эмпирически, наблюдая движения планет с повышенной точностью. Однако на практике, из-за крайней малости λ (предполагая, что оно вообще существует), эмпирические наблюдения такого рода будут недостаточны для его обнаружения. Единственным способом, которым мы можем непосредственно установить его существование (и, вместе с тем, конечность Вселенной), будет наблюдение за движением звезд в шаровых скоплениях или в Млечном Пути (как мы объясним позже). Все, что мы можем сказать в настоящее время, это то, что существование конечной Вселенной доказано как возможность, по крайней мере, с точки зрения математических требований теории относительности.

Мы могли бы попытаться решить этот вопрос, обратившись к принципу действия. Но и в этом случае обе гипотезы, как о бесконечной, так и о конечной Вселенной, окажутся возможными; поэтому нам придется рассмотреть какой-то другой метод решения этой проблемы.

Все, что мы сделали до этого момента, — это показали, что гравитационные уравнения Эйнштейна (или уравнения кривизны пространства-времени) несовместимы с существованием конечной Вселенной. Однако если предположить наличие очень маленького члена λ , слишком маленького, чтобы повлиять на наблюдаемые движения планет, то получится конечная Вселенная. Короче говоря, конечная вселенная теоретически возможна. Но прежде чем далее рассматривать эту проблему, мы вполне можем спросить, что дает нам это дополнительное усложнение.

Первоначальные гравитационные уравнения, предполагающие идеальную плоскость пространства-времени в бесконечности, казалось, давали удовлетворительные результаты. Кроме того, когда Эйнштейн предположил, что пространство-время дегенерирует до идеальной плоскости в бесконечности, он просто выражал действие принципа инерции в областях, удаленных от влияния материи. Другими словами, в бесконечности, вдали от материи, свободные тела будут двигаться по прямой с постоянной скоростью (измеренной в галилеевой системе отсчета). Конечно, принцип инерции мог быть неверным, но до тех пор, пока его действительность не была серьезно поставлена под сомнение, было вполне естественно его принимать. С другой стороны, в случае конечной вселенной мы должны были бы предположить, что пространство-время всегда сохраняет остаточный след кривизны, так что прямолинейное движение свободных тел было бы невозможно. Свободное движение происходило бы по кругам с огромным радиусом.

Здесь, однако, мы должны напомнить, что теория Эйнштейна не является набором необоснованных догадок. Если бы Эйнштейн был заинтересован лишь в том, чтобы сделать вселенную такой или иной, не принимая во внимание совокупность фактов, имеющих в распоряжении ученых, его космологические спекуляции не заслуживали бы большего внимания, чем спекуляции греков, Данте или философов XVII и XVIII веков. Однако мы можем быть совершенно уверены, что у такого добросовестного ученого, как Эйнштейн, методологический подход будет совсем иным. И поэтому, когда мы обнаруживаем, что теория, которую он отстаивает, предполагает конечную вселенную, мы можем

предположить, что у него есть очень веские причины для такого выбора. Действительно, как мы увидим, к этому решению приводит ряд отдельных соображений. Прежде всего, это кажущаяся стабильность конфигурации распределения звезд. Кроме того, у нас есть такие философские соображения, как вероятная физическая относительность всех движений и инерции в соответствии с идеями Маха; внутренне аморфная природа всех пустых непрерывных протяженностей, как того требует Риман; стремление обнаружить единство в природе, доказав, что материя может быть сведена к электричеству и гравитации. Все эти факты, наряду со многими другими, могут быть удовлетворены только при условии, что мы предположим, что Вселенная конечна. К сожалению, для правильного понимания связанных с этим проблем необходимо обратиться к математическому анализу. Однако мы постараемся действовать очень грубо, не вводя в значительной степени математические символы.

Существует два основных решения для конечной вселенной. Первое — это *сферическая, эллиптическая* или, более строго, **гиперболическая вселенная** де Ситтера; второе — **цилиндрическая вселенная**, отстаиваемая Эйнштейном. Сначала рассмотрим вселенную де Ситтера. Но прежде чем обсуждать эти сложные темы, необходимо упомянуть некоторые особенности законов природы.

В большинстве случаев законы природы выражаются в виде законов смежных изменений в пространстве и времени. Математически это эквивалентно утверждению, что законы выражаются дифференциальными уравнениями. Дифференциальные уравнения дают нам закон изменения величин от места к месту или от времени к времени, но они не дают нам точных значений этих величин.

Рассмотрим, например, следующее дифференциальное утверждение: «Поезд удаляется от нас с постоянным ускорением в одну милю в секунду». Это дифференциальное уравнение, хотя и определяет характер движения, не позволяет нам вычислить положение поезда в любой конкретный момент времени. Чтобы решить эту задачу, мы должны знать положение поезда, а также его скорость в какой-то начальный момент времени. Эта иллюстрация дает нам представление об ограничениях дифференциальных утверждений или уравнений. Чтобы сделать их определёнными, мы всегда должны дополнять их дополнительной информацией, указывая значение переменной величины в какой-то определённой точке или в какой-то момент времени. В частности, когда мы рассматриваем величину, которая может изменяться в соответствии с некоторым дифференциальным законом от точки к точке во всей области трехмерного пространства, мы должны указать значение и другие характеристики величины, или переменной, на замкнутой поверхности, ограничивающей эту область пространства. В математической терминологии мы должны знать граничные условия, прежде чем закон можно будет считать полностью определенным.

$\Delta\Phi = 4\pi k\mu$ Применим эти соображения к дифференциальному закону, который выражает закон притяжения Ньютона. Как мы уже видели, он задается уравнением Пуассона и выражает закон распределения Φ (потенциал Ньютона) в гравитационном поле вокруг материи и внутри материи (где μ — плотность материи в разных точках). Однако в этой форме закон является неопределенным, поскольку дает ряд законов, отличающихся от закона обратной квадратичной зависимости Ньютона. Математики доказали, что для получения закона Ньютона необходимо дополнить дифференциальное уравнение, указав, что потенциал Φ стремится к постоянному конечному пределу в пространственной бесконечности.

Теперь, в теории Эйнштейна, аналогом закона Пуассона является закон кривизны

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik}.$$

пространства-времени,

Так же как закон Пуассона был дифференциальным законом распределения ньютоновского потенциала, так и теперь закон Эйнштейна является дифференциальным законом распределения десяти потенциалов, десяти g_{ik} ; а T_{ik} — это энергия и импульс материи в каждой точке. Опять же, как и в случае уравнения Пуассона, мы должны дополнить эти дифференциальные уравнения гравитационного поля, указав значения g_{ik} на границе в бесконечности.

Конечно, потенциалы гравитационного поля (g_{ik}) не являются числами или скалярами, как энергия и импульс материи (Φ); они являются тензорами. Следовательно, их значения в одной точке будут варьироваться в зависимости от выбранной нами системы координат или системы отсчета. Тем не менее, если мы определим наш выбор системы отсчета и решим, какие значения должны иметь потенциалы гравитационного поля (g_{ik}) в этой системе, их значения во всех других системах будут определены автоматически. Это, конечно, связано с тем, что потенциалы гравитационного поля (g_{ik}) являются тензорами.

В теории, как мы описали до этого момента, Эйнштейн выбрал декартову систему координат пространства-времени, то есть галилееву систему отсчета, и предположил, что, измеренные в этой системе координат, g_{ik} в бесконечности должны быть заданы как

$$g_{11} = g_{22} = g_{33} = +1; \quad g_{44} = -1,$$

все остальные g_{ik} исчезают. Эти граничные условия подразумевали, что пространство-время было идеально плоским в бесконечности, следовательно, удовлетворяло уравнению $B_{ikst} = 0$. Можно понять, что мы просто выражаем другим способом то, что было сказано в начале главы; граничные значения, написанные выше, и плоскость пространства-времени в бесконечности являются эквивалентными утверждениями. В этих условиях мы видели, что вселенная не может быть конечной; мы должны иметь квазиевклидову бесконечную пространственно-временную вселенную.

Теперь, по мнению как Эйнштейна, так и де Ситтера, это предположение о совершенной плоскости в бесконечности было слишком радикальным. Хотя эта совершенная плоскость и согласуется с законом инерции, довольно произвольно предполагать, что этот закон должен действовать в бесконечности, даже если мы согласимся, что он действует в менее отдаленных областях, что отнюдь не является достоверным выводом. По словам самого Эйнштейна: «Безусловно, неудовлетворительно постулировать такое далеко идущее ограничение без каких-либо физических оснований».

В дополнение к этой первой причине сомневаться в идеальной плоскости пространства-времени Эйнштейна-Метцгера () в бесконечности, мы должны помнить, что коэффициенты Метцгера (g_{ik}) не сохраняют свои стандартные граничные значения (1, 1, 1, -1), когда мы меняем нашу систему сетки. g_{ik} в любой системе отсчета, кроме галилеевой, например, во вращающейся системе отсчета, эти граничные значения в бесконечности будут изменены; это, конечно, связано с тем, что тензоры Эйнштейна являются тензорами. Отсюда следует,

что чрезвычайно простые граничные значения, по-видимому, выделяют привилегированную систему отсчета (галилееву), а это, по мнению Эйнштейна, противоречит духу теории относительности. В любом случае, что бы ни думали о силе этих аргументов, легко видеть, что если мы хотим присвоить инвариантные значения g_{ik} в бесконечности, значения, которые останутся одинаковыми во всех системах отсчета, простейшим решением будет предположить, что все они исчезают в бесконечности. Тогда, конечно, благодаря их тензорной природе, их исчезновение в любой одной системе отсчета гарантирует их исчезновение во всех других системах отсчета. Это и было решением де Ситтера: все g_{ik} исчезают в бесконечности.

Де Ситтер приводит еще один аргумент в защиту своего решения. Он касается относительности массы или инерции, но поскольку я не смог согласовать его взгляды на эту тему с характеристиками его вселенной, возможно, я неправильно понял его идею; поэтому я не могу ее обсуждать. В любом случае, относительность инерции является наиболее важным аргументом в пользу цилиндрической вселенной Эйнштейна, поэтому мы рассмотрим ее при рассмотрении решения Эйнштейна.

Теперь, когда мы принимаем исчезающие значения де Ситтера для потенциалов в бесконечности (g_{ik}), прямым результатом является конечная пространственно-временная вселенная. Таким образом, мы видим, что таким образом граничные условия были полностью устранены, поскольку в конечной вселенной, замкнутой на себе, больше нет границ. Точная форма вселенной де Ситтера представляет собой сферическое четырехмерное пространство-время. Когда оно пустое, оно задается уравнением $G_{ik} = -\frac{\lambda}{2}g_{ik}$. Другими словами, это тип вселенной, к которому мы приходим, когда термин λ включается в гравитационные уравнения; следовательно, как мы видели, это тип, который теоретически возможен.

Таким образом, характеристики вселенной де Ситтера являются характеристиками сферического четырехмерного пространства-времени с радиусом $\sqrt{-\frac{6}{\lambda}}$. Что касается λ , то его величина пропорциональна кривизне вселенной. На самом деле, более правильным было бы название «*гиперболическая вселенная*», поскольку это *пространство-время* имеет сферическую кривизну, а не пространство и время. Здесь мы должны помнить, что в пространстве-времени пространство является реальным, а время — мнимым; и если мы хотим выразить форму вселенной в терминах *реального* времени, а не мнимого, то правильной будет гиперболическая форма. [\(106\)](#)

Как мы объяснили в примечании, вселенная де Ситтера открыта в обоих концах по направлению времени, так что время не возвращается, как это было бы в сферической вселенной. Когда мы рассматриваем точки, все более удаленные от того места, где мы находимся, все потенциалы g_{ik} уменьшаются и в конце концов исчезают, как того требовали обсужденные ранее условия. В частности, это уменьшение и окончательное исчезновение потенциала g_{44} указывают, соответственно, на постепенное замедление и полную остановку времени в отдаленных областях вселенной. Однако эта остановка времени является фиктивной, поскольку, если бы мы перенеслись в рассматриваемую точку, мы обнаружили бы, что все идет как обычно. Теперь остановка времени казалась бы полной именно там, где мы находились ранее. Таким образом, для каждого наблюдателя существовал бы местоположение удаленных точек, где, казалось бы, ничего не меняется и не движется. Луч

света никогда не смог бы обогнуть вселенную, но постепенно замедлился бы и в конечном итоге остановился бы, достигнув этого пассивного горизонта наблюдателя.

Мы также видим, что чем ближе раскаленный атом находится к этому пассивному горизонту, тем медленнее будут его колебания; следовательно, в случае атома натрия (излучающего желтый свет в нормальных условиях), его свет будет тем краснее, пока, наконец, свет не исчезнет полностью, когда атом достигнет пассивного горизонта. Так вот, среди самых удаленных известных светящихся тел, а именно спиральных туманностей, подавляющее большинство действительно, по-видимому, излучает замедленные световые колебания. Конечно, этот эффект можно объяснить общей тенденцией всех спиральных туманностей удаляться от Солнечной системы. Но поскольку удовлетворительной причины для объяснения этого общего удаления найти не удастся, Эддингтон считает, что гипотеза де Ситтера о гиперболической вселенной имеет много достоинств.

Необходимо сделать еще несколько замечаний по поводу вселенной де Ситтера. Мы помним, что в теории Эйнштейна идеальная плоскость пространства-времени влекла за собой полное отсутствие гравитационных или инерционных сил (по крайней мере, с точки зрения галилеева наблюдателя). Поэтому, если бы не кривизна, которую сама материя накладывает на пространство-время вокруг себя, две частицы материи никогда бы не притягивались друг к другу. Однако во вселенной де Ситтера в каждой точке существует остаточная гиперболическая кривизна пространства-времени, независимо от дополнительной кривизны, накладываемой материей. Эта универсальная кривизна, как можно показать с помощью расчетов, вызывала бы взаимное отталкивание между телами. Если бы эти тела не были крошечными, это всеобщее отталкивание было бы уравновешено и преодолено более значительной кривизной, создаваемой самими телами, так что, несмотря ни на что, гравитационное притяжение было бы объяснено. Тем не менее, это привело бы нас к крайне неприятной двойственности в нашем представлении о гравитационном действии, поскольку мы имели бы дело с двумя отдельными явлениями:

1. Всеобщее отталкивание, которое совершенно чуждо материи;
2. Гравитационное притяжение между материей и материей.

Таким образом, было бы невозможно избежать двойственности в нашем представлении о гравитации, если под гравитацией мы подразумеваем совокупное действие обоих эффектов, приводящее к одному наблюдаемому притяжению материи к материи.

Мы можем обобщить основные характеристики вселенной де Ситтера следующим образом: во-первых, эта вселенная может существовать в отсутствии любой материи. Тогда

она обладает определенной сферической структурой и радиусом кривизны $= \sqrt{-\frac{6}{\lambda}}$, где λ , пропорциональный вселенской кривизне, является некоторой константой, не имеющей ощутимого отношения к чему-либо еще во вселенной.^[107] Мы должны представлять ее как константу природы, установленную раз и навсегда Создателем. Во-вторых, если в эту пустую вселенную ввести материю, она вызовет локальные сгибы или кривизну пространства-времени вокруг себя; и именно этим локальным кривизнам будет обьязано явление притяжения между материей и материей. В присутствии материи вселенная де Ситтера не будет стабильной, поскольку вселенское отталкивание будет стремиться к рассеиванию материи, если взаимные притяжения будут слишком слабы, чтобы противостоять ему.

По мнению ряда мыслителей, вселенная де Ситтера имеет некоторые аспекты, которые являются весьма неудовлетворительными. Мы обсудим их позже. В любом случае,

Эйнштейн отвергает ее и, следуя несколько иной линии нападения, приходит к совершенно иному типу конечной вселенной, *цилиндрической вселенной*.

Теперь мы перейдем к более подробному изучению вселенной Эйнштейна. Прежде всего, мы должны упомянуть некоторые общие космологические соображения, которые привели Эйнштейна к формулировке гипотезы о конечной вселенной.

Совершенно независимо от теории относительности, в те дни, когда пространство-время было неизвестно, астрономы ломали голову над некоторыми трудностями, связанными со Вселенной в целом. Появились две возможные версии. Либо звездная материя присутствовала повсюду, более или менее равномерно распределяясь по бесконечному пространству, либо звезды были сконцентрированы в ядре, образуя остров материи в бесконечном океане пространства.

Первый вариант влек за собой определенные трудности, когда мы рассматривали освещение неба ночью. Расчеты показали, что ночное небо должно быть в разы ярче, чем оно есть на самом деле. Конечно, эту трудность можно было преодолеть, предположив, что по мере удаления от Земли процент темных звезд увеличивается; или же, что огромные количества космической пыли перехватывают свет и затмевают небо. Можно было также предположить, что свет постепенно поглощается на своем долгом пути от далеких звезд.

Помимо этих первых трудностей, было показано, что если звезды притягиваются друг к другу в соответствии с законом Ньютона, то они не могут быть распределены более или менее равномерно по бесконечному пространству; скорее они будут концентрироваться в ядре. Точные вычисления показывают, что плотность вещества, а значит и количество звезд на единицу объема, будет стремиться к нулю в бесконечности, уменьшаясь от центра

быстрее, чем $\frac{1}{r^2}$, где r представляет расстояние от центра. Получается, что ядро звезд неизбежно, если закон Ньютона верный.^[108] Астроном Зеелигер попытался реализовать бесконечно расширенную вселенную материи, соответствующим образом модифицировав закон Ньютона. Но, как отмечает Эйнштейн, эта попытка не имела ни эмпирического, ни теоретического обоснования.

Итак, если мы принимаем закон Ньютона, мы должны предположить, что Вселенная представляет собой ядро звезд, потерянное в бесконечном пространстве. Но здесь нас снова ждет новая трудность. Во-первых, астрономические наблюдения не показывают никаких следов такого ядра. Конечно, можно утверждать, что это связано с ограниченным диапазоном наших астрономических наблюдений. Тем не менее, этот первый аргумент против гипотезы о ядре нельзя игнорировать, поскольку мы должны помнить, что в этих спекуляциях о форме Вселенной мы вынуждены использовать самые слабые улики; мы не можем действовать так, как в лаборатории.

Есть и второй аргумент против гипотезы о ядре. Расчеты показывают, что совокупное гравитационное притяжение звезд по Ньютону было бы недостаточно, чтобы удержать любую отдельную звезду и помешать ей улечь в бесконечность, навсегда покинув ядро. Аналогичные выводы применимы к лучам света. Из этого следует, что наша вселенная звезд находится в состоянии распада. Конечно, возможно, что это действительно так; однако для ряда мыслителей вселенная, находящаяся в процессе распада, казалась крайне маловероятной. С законом всемирного тяготения Ньютона не было никакого спасения. Это была космологическая трудность « », с которой пришлось столкнуться классической науке.

Поскольку обоснование этих утверждений не содержит каких-либо очень сложных идей, мы можем приступить к их краткому объяснению. Рассмотрим гипотетический случай,

когда Земля находится в бесконечном пространстве и изолирована от всех других тел. Если в этом случае масса будет брошена в пространственной бесконечности, она будет притягиваться к Земле, постепенно набирая скорость, и в конце концов может удариться о поверхность Земли с определенной скоростью, которая, по расчетам, составляет около семи

$$\frac{1}{2}v^2 = \Phi_{\infty} - \Phi_E,$$

миль в секунду. Эта конкретная скорость v определяется следующей формулой:

где Φ_{∞} представляет собой значение ньютоновского потенциала в бесконечности, а Φ_E — его значение на поверхности Земли.⁽¹⁰⁹⁾ И наоборот, если тело выстреливается радиально с поверхности Земли с начальной скоростью, меньшей этой критической скорости v , оно всегда будет возвращаться в окрестности Земли. С другой стороны, если начальная скорость тела будет больше критической скорости v , оно никогда не вернется. Таким образом, мы видим, что значение этой критической скорости зависит от разницы значений ньютоновского потенциала в бесконечности и на поверхности Земли.

Теперь рассмотрим случай ядра звезд. Звезды будут двигаться с разными скоростями под влиянием взаимного гравитационного притяжения. Статистическая механика показывает, что время от времени вся энергия звездной вселенной будет передаваться одной единственной звезде; эта звезда будет тогда двигаться с огромной скоростью. Поскольку общая энергия звездной вселенной конечна, эта скорость никогда не будет бесконечной, так что будет существовать максимальная конечная скорость, которую ни одна звезда ядра не сможет превзойти. Поэтому, если мы рассмотрим ньютоновский потенциал, обусловленный всем ядром звезд, и если разница в значении этого потенциала в бесконечности и вблизи центра ядра будет достаточно велика, ни одна звезда никогда не сможет оторваться и исчезнуть в бесконечности.

Из этого может показаться, что ядро звезд может существовать вечно в соответствии с законом Ньютона. Теоретически это возможно, но астрономические наблюдения доказывают, что эту возможность следует отвергнуть. Ведь если бы в центре Вселенной существовали очень большие колебания потенциала (как того требует предыдущая гипотеза), это привело бы к огромным скоростям звезд. Однако выдающимся астрономическим фактом является то, что скорости звезд чрезвычайно низки, что доказывает, что потенциал варьируется лишь незначительно от места к месту во всей вселенной, даже на огромных астрономических расстояниях. Таким образом, представляется, что ядро удерживается вместе очень слабо, и звезде не нужно обладать чрезмерно высокой скоростью, чтобы оторваться и исчезнуть навсегда.

В дополнение к этой первой трудности, когда закон Больцмана о газовом равновесии применяется к звездам, рассматривая последние как множество молекул, ядерная форма Вселенной кажется совершенно невозможной.

До сих пор мы рассматривали проблему Вселенной с точки зрения классической науки и закона Ньютона. Наши аргументы не претерпевают значительных изменений, когда мы рассматриваем ту же проблему с точки зрения закона гравитации Эйнштейна и бесконечной квазиевклидовой Вселенной. И снова, по-видимому, имеет место постоянное обеднение ядра. Однако здесь можно упомянуть один новый момент. В классической науке мы

рассматривали ньютоновский потенциал Φ и исследовали его значение во всей Вселенной, наблюдая скорости звезд. В теории пространства-времени потенциал Φ (или, точнее, определенное математическое выражение, в которое входит Φ) занимает место Φ . Теперь Φ также влияет на течение времени, а значит, и на частоту колебаний атомов (как в эффекте Эйнштейна); и поэтому мы можем обнаруживать изменения значения потенциала Φ от места к месту с помощью спектроскопических наблюдений. Но когда мы проводим наши наблюдения из галилеевой системы отсчета (в данном случае подойдет Земля), мы замечаем, что линии в спектрах самых удаленных туманностей занимают положения, практически идентичные положениям земных источников, откуда мы можем сделать вывод, что настолько, насколько может исследовать телескоп, значение Φ остается приблизительно постоянным. Что касается скоростей звезд, то на них будут влиять значения всех Φ_{ik} . Итак, здесь мы снова видим, что из-за низких скоростей звезд все значения Φ_{ik} незначительно варьируются от места к месту во всей вселенной (при вычислении в галилеевой системе отсчета). Таким образом, согласно теории Эйнштейна, как и согласно теории Ньютона, по-видимому, ничто не мешает звездам и лучам света покидать ядро; взаимное гравитационное притяжение было бы недостаточным, чтобы удержать их.

Короче говоря, если бы существовала самодостаточная вселенная, то *где-то что-то* должно было бы быть изменено.

Теперь мы подошли к окончательному решению Эйнштейна, а именно к *цилиндрической вселенной*. Он заметил, что низкие скорости звезд в сочетании с их более или менее равномерным распределением в пространстве позволяют предположить, что они находятся в состоянии *статистического равновесия*. Несколько строк объяснят, что это означает.

Предположим, что на бильярдном столе, содержащем очень большое количество одинаковых шаров, мы придаем быстрому движению одному из них. Наш шар в конечном итоге столкнется с некоторыми из других. Эти другие, в свою очередь, столкнутся с еще другими, и в конце концов все шары придут в движение, и если не будет никакого трения и потери импульса при отскоке шаров от бортов, они будут двигаться вечно. Но с течением времени произойдет постепенное изменение. Постепенно мы обнаружим, что энергия, которую мы придали первому шару, как будто распределилась между всеми шарами на столе, так что в конце концов, в среднем, все шары будут двигаться с примерно одинаковой скоростью. Когда будет достигнуто это состояние *равномерного распределения энергии*, мы достигнем стабильности конфигурации, или *статистического равновесия*. Это состояние равновесия будет соответствовать максимальной энтропии и будет длиться вечно.⁽¹¹⁰⁾ Мы видим, что оно характеризуется тем, что все шарики обладают более или менее одинаковой энергией или скоростью.

Теперь, как мы уже сказали, астрономические наблюдения позволяют предположить, что звездная вселенная достигла этого состояния статистического равновесия. Поэтому допустимо пренебречь незначительными неравномерностями и скоплениями в распределении звездной материи и ассимилировать всю звездную вселенную с огромным облаком космической пыли, находящимся в относительном покое и имеющим одинаковую плотность повсюду. Тогда выясняется, что для поддержания постоянной, стабильной конфигурации этого облака пыли направление времени во вселенной в целом для наблюдателя, не вращающегося относительно звезд, *должно быть прямым*. Легко понять, почему возникает это условие.

Если звезды можно считать находящимися в относительном покое, поскольку их мировые линии составляют геодезические линии пространства-времени, то необходимо, чтобы эти геодезические линии не сходились, а лежали вдоль параллельных направлений

времени через пространство-время. Это возможно только при условии, что структура пространства-времени такова, что одно и то же направление времени сохраняется в каждой точке пространства для наблюдателя, находящегося в покое относительно распределения звезд. Таким образом, мы получаем одно и то же прямое направление времени для Вселенной. Конечно, это не означает, что вокруг каждой отдельной звезды кривизна пространства-времени, а значит, и направление времени, не подвергаются изменениям. Далеко не так, поскольку именно эти локальные кривизны ответственны за гравитационное притяжение между материей и материей. Однако в данном случае нас интересует исключительно структура пространства-времени в целом, в масштабах всей Вселенной, так что распределение звезд можно рассматривать как равномерное и сравнивать с гигантским облаком пыли. Следовательно, стабильность требует, чтобы эта ультрамакроскопическая структура определялась прямым направлением времени. Это исключает вселенную де Ситтера, поскольку в его модели направление времени было искривленным, и, следовательно, его вселенная не была стабильной.

Конечным результатом расчетов Эйнштейна было показано, что если бы вселенная была замкнутым трехмерным сферическим (или эллиптическим) пространством, а не пространством-временем, на котором была построена прямая ось времени, то стабильность была бы возможна, скорости звезд оставались бы низкими, а их распределение — равномерным. Таким образом, мы должны были бы получить *цилиндрическую вселенную*, где направление времени, проходящее от минус до плюс бесконечности, представляло бы ось цилиндра.

Но здесь необходимо отметить один очень важный момент. Для поддержания стабильности должно быть выполнено определенное условие. Расчеты, основанные на формуле λ , упомянутой на [стр. 314](#), доказывают, что средняя плотность μ материи должна быть равна λ . Другими словами, общее количество материи в мире должно быть пропорционально радиусу вселенной.

Предполагая, что эти условия выполняются, можно было бы вычислить объем Вселенной, если бы мы знали среднюю плотность распределения материи μ . Поскольку $\mu = \lambda$, а гауссова кривизна пространства зависит от λ , знание этой кривизны дало бы нам общее пространственное расширение Вселенной. Теперь значение средней плотности звездной материи μ было вычислено астрономами. Если мы примем это значение μ , то получим для Вселенной размеры, которые, безусловно, слишком малы, поскольку они противоречат огромным расстояниям, приписываемым спиральным туманностям. Таким образом, казалось бы, что цилиндрическая Вселенная несовместима с фактами наблюдений. Но, как отмечает Эйнштейн, нельзя полагаться на значение μ , общепринятое астрономами. По его собственным словам:

«Распределение видимых звезд чрезвычайно неравномерно, поэтому мы ни в коем случае не можем рискнуть установить среднюю плотность звездной материи во Вселенной равной, скажем, средней плотности в Млечном Пути. В любом случае, каким бы большим ни было исследуемое пространство, мы не могли бы быть уверены, что за пределами этого пространства нет больше звезд. Поэтому кажется невозможным оценить среднюю плотность».

Затем Эйнштейн предлагает косвенный метод определения значения μ , а значит, и λ и размера Вселенной. Мы обсудим этот метод на следующей странице; он связан с движением звезд в Млечном Пути.

Легко понять, почему в цилиндрическом мире не нужно существования ядра звезд. Двумерный аналог распределения звезд, равномерно распределенных по всему объему

трехмерного сферического пространства, будет представлен однородным распределением звезд по двумерной поверхности обычной сферы, расположенной в трехмерном евклидовом пространстве.^[111] Аналогом пространства Вселенной была бы фактическая поверхность сферы, а не объем, заключенный в sphere. Причины симметрии показывают нам с первого взгляда, что равномерное распределение материи на сферической поверхности было бы стабильным, поскольку нет причин для образования ядра *здесь*, а не *там*.

Точно так же наблюдатель, движущийся в трехмерном пространстве Вселенной, будет представлен идеально плоским существом, движущимся по поверхности двумерной сферы. Куда бы ни двигалось это воображаемое существо, распределение звезд на поверхности сферы будет казаться одинаковым. Точно так же в сферическом пространстве Вселенной, куда бы мы ни двигались, распределение звезд вокруг нас останется однородным.^[112] Таким образом, цилиндрическая вселенная избавляет нас от неприятной необходимости верить в существование острова звездной материи в океане пустоты.

Во вселенной Эйнштейна луч света, следуя геодезической линии, обогнал бы вселенную и вернулся бы в свою исходную точку. Это составляет разницу по сравнению со вселенной де Ситтера, в которой луч света был бы остановлен на пассивном горизонте. В цилиндрической вселенной, благодаря прямолинейности направления времени, горизонта нет. По той же причине в отдаленных областях пространства не будет замедления времени, так что общее покраснение света, излучаемого спиральными туманностями, будет трудно объяснить во вселенной Эйнштейна. Схема де Ситтера, как мы уже отмечали, дает непосредственное объяснение этому замечательному эффекту.

Иногда считалось, что лучи света, излучаемые звездой, будут кружить по вселенной во всех направлениях, а затем снова встретятся в антиподах пространства, образуя призрак звезды. Следует отметить, что, хотя теоретически это возможно, вероятность реализации этого на практике, мягко говоря, крайне мала. Дело в том, что идеальная сферичность вселенного может сохраняться только при условии, что материя распределена однородно и везде находится в покое. Поскольку в реальной вселенной это верно лишь приблизительно, сферическая пространственная вселенная будет иметь волнистую форму и более или менее отклоняться от этой простой формы. В результате лучи света, испускаемые звездой, не будут точно сходиться в антиподах, поэтому призраки звезд не нужно принимать во внимание.

Далее мы должны рассмотреть ограничивающее условие $\lambda = \mu$, которое должно было быть выполнено, чтобы вселенная Эйнштейна была стабильной. Мы помним, что λ пропорционально пространственной кривизне вселенной, тогда как μ представляет собой среднюю плотность материи. Теперь кажется необычным, что плотность материи во вселенной как раз равна λ . Однако Эйнштейн настаивает, что это равенство λ и μ вовсе не является совпадением; по его мнению, между этими двумя величинами существует причинно-следственная связь. Плотность материи создает λ , или, другими словами, общее количество материи во вселенной создает пространство вселенной. Если бы было создано больше материи, вселенная расширилась бы; если бы часть материи была уничтожена, вселенная сжалась бы. Действительно, если бы не было материи, не было бы и пространства; следовательно, полностью пустая вселенная была бы совершенно невозможна. Таким образом, существует заметная разница между вселенной Эйнштейна и вселенной де Ситтера, которая может существовать без материи.

Можно также упомянуть еще одну причину, которая привела Эйнштейна к цилиндрической вселенной. Мы помним, что при обсуждении граничных значений g_{ik} мы видели, что де Ситтер считал необходимым получить граничные значения, которые оставались бы неизменными при изменении системы координат. В соответствии с этим требованием он предположил, что все g_{ik} исчезают на границе. В результате он получил свою гиперболическую вселенную. Аналогичные соображения побудили Эйнштейна. Здесь, однако, следует отметить, что в модели Эйнштейна, в то время как все пространственные g_{ik} (g_{11}, g_{22}, g_{33}) исчезают в бесконечности в нашей системе координат, временные g_{ik} (g_{44}) из-за прямолинейности направления времени не исчезают. Для наблюдателя, находящегося в покое относительно звезд, она принимает значение +1. Отсюда следует, что когда мы меняем не только нашу пространственную сетку, но и пространственно-временную сетку, значения g_{ik} подвергаются изменениям, так что условие инвариантности де Ситтера не выполняется полностью. Вследствие этого де Ситтер утверждает, что вселенная Эйнштейна не приводит к истинной теории относительности.

Кроме того, будет видно, что цилиндрическая вселенная вводит вид абсолютного времени, и это снова было использовано в качестве аргумента против ее принятия. Но следует заметить, что это абсолютное время появляется только тогда, когда мы рассматриваем вселенную как целое. Для обычных задач, ограниченных меньшими областями, слияние пространства и времени остается полным, как и раньше.

Конечно, очевидно, что при изменении граничных условий, как это сделал Эйнштейн, заменив квазиевклидовую вселенную цилиндрической, гравитационные уравнения будут несколько изменены. Они больше не будут теми, которые приводили к двойному изгибу луча света. Теперь в их выражении будет включен дополнительный член λ ; однако, что касается движения планет, наличие этого дополнительного члена не изменит наших результатов. В вселенной де Ситтера введение посторонней величины λ в закон гравитации было несколько неудовлетворительным, поскольку портило простую красоту уравнений; λ было некоторой независимой константой, постулированной Создателем. Тот же аргумент вряд ли можно было бы использовать против уравнений Эйнштейна, поскольку следует помнить, что, если, как предполагает Эйнштейн, λ следует отнести к материи Вселенной, то круг замыкается, поскольку, по крайней мере косвенно, в закон гравитации входит только материя. Согласно этой точке зрения, мы могли бы сказать, что общее количество материи во Вселенной объединилось, чтобы создать гигантский закон гравитации. Таким образом, под кумулятивным действием материи лучи света и свободные тела описывают круги.

С философской точки зрения цилиндрическая вселенная представляет большой интерес с точки зрения; она оправдывает предчувствия Римана о том, что материя должна создавать метрику фундаментального континуума. Риман, конечно, думал только о пространстве, поскольку пространство-время было ему неизвестно; но, за исключением этого различия, результаты Эйнштейна подтверждают глубокие взгляды Римана. Действительно, помимо этих спекуляций о вселенной, общая теория уже принесла частичное подтверждение идей Римана, доказав, что материя может влиять на структуру пространства-времени. Однако позиция Римана была более радикальной. Речь шла не просто о том, что материя изменяет уже существующую пространственную структуру, но о том, что она создает ее *целиком*.

Как в квазиевклидовой бесконечной вселенной, так и в вселенной де Ситтера, роль материи, хотя и важна локально, была второстепенной, если рассматривать мир в космическом масштабе, поскольку структура пространства-времени могла существовать независимо от всей материи. Отсюда следовало, что материя была бы случайной, а не существенной. Эддингтон не видит никаких возражений против этих идей. Он предполагает,

что в природе пустого пространства-времени вполне может быть скручиваться вокруг себя и проявлять определенную метрику, кривизну и размер. Но такая позиция приводит к дуалистической концепции, если помнить, что материя влияет на структуру пространства-времени локально. С этой точки зрения, как в квазиравличной вселенной де Ситтера, так и в бесконечной квазиравличной вселенной, физические свойства пространства-времени, хотя и обусловлены в основном характеристиками, присущими самому пространству, все же частично зависят от наличия материи. В таком случае мы едва ли сможем избежать дуалистической концепции пространства, которая для многих будет неприемлема.

Эддингтон устраняет этот дуализм, переворачивая проблему и предполагая, что физические свойства и геометрия пространства-времени возникают из требований самого пространства-времени. Согласно этой точке зрения, материя не является активной причиной, а лишь симптомом, и сводится к простым областям большей кривизны или складкам в пространстве-времени или метрическом поле. Наши чувства интерпретируют это как признак присутствия материи. Однако кажется трудным согласовать эти идеи со сложностью материи, поскольку материя в значительной степени состоит из электрических зарядов. Следовательно, сведение материи к изменениям в геометрии пространства-времени было бы равносильно сведению электричества к «*g_{ik}*». По крайней мере, до сих пор такие попытки были безуспешны. В любом случае, Эйнштейн отвергает эту точку зрения. Он утверждает, что совершенно пустое континуум, пустота — называйте ее пространством-временем, пространством или как-либо еще — должно быть полностью аморфным, то есть не может обладать никакой собственной метрикой или структурой, поскольку пустота со структурой — это вовсе не пустота.^[113]

Кроме того, даже если бы было признано, что пространство на самом деле не пустое, а заполнено эфиром, который придает ему структуру и отвечает за его динамические свойства, было бы невероятно, чтобы эта структура была не однородной. Следовательно, было логично предположить, что локальные изменения кривизны, сопровождающие наличие скоплений материи, следует объяснять наличием самой этой материи, так что материя снова была бы причиной, а не симптомом. Самым простым способом избежать двойственной концепции, о которой мы упоминали ранее, было признать, что Риман был прав и что метрика или метрическое поле пространства-времени Вселенной было обусловлено в своей совокупности, а не просто модифицировано присутствием материи. В любом случае, если придерживаться этих взглядов, легко увидеть, что цилиндрическая вселенная является единственной приемлемой, поскольку она единственная, в которой метрика пространства-времени может быть обусловлена исключительно действием материи.^[114]

Интересно отметить, что вполне возможно, что взгляды Римана в конечном итоге будут подвергнуты проверке. Допустим, что астрономические наблюдения докажут, что вселенная де Ситтера или квазииневклидова бесконечная вселенная были правильными: тогда идеи Римана придется отбросить. Мы должны были бы прийти к выводу, что метрика присуща пустому непрерывному расширению; хотя, конечно, мы всегда могли бы избежать такой позиции, либо предположив, что пространство является атомарным, либо, опять же, отождествив метрическое поле с каким-то тонким эфиром, плавающим в пространстве.

Теперь мы подошли к еще одному важному соображению, которое подтолкнуло Эйнштейна к идее цилиндрической Вселенной. Речь идет о *относительности инерции*. В общей теории относительности, до исследований Эйнштейна о форме Вселенной, существовал ряд весьма неприятных двойственных явлений. Во-первых, теория относительности успешно доказала, что скорость движения в пространстве является относительной, но не смогла распространить эту относительность на ускоренное движение.

Сделав многообещающий шаг к релятивизации всех видов движения, она отказалась от этой попытки на полпути, не достигнув конечной цели.

С другой стороны, аналогичная двойственность существовала в случае массы и веса. Здесь мы имеем *вес*, зависящий от распределения окружающей материи, так что вес не существовал бы в мире, содержащем только одно тело. С другой стороны, существует инерционная масса тела, которая сохраняется даже в пустом мире. Таким образом, если бы мы оказались вдали от всех крупных масс, мы могли бы без малейшего усилия поднять над головой тонну кирпичей, поскольку кирпичи не имели бы веса. И все же, когда мы попытались бы отодвинуть эти же кирпичи в сторону, мы столкнулись бы с таким же инерционным сопротивлением, как и на Земле. Что делало эту двойственность особенно неприятной, так это тот факт, что общая теория доказала, что даже масса в незначительной степени подвержена влиянию близости материи, так что масса тела, по-видимому, частично обусловлена распределением окружающей материи, а частично — самим телом. Другими словами, существовала частичная относительность инерции, так же как существовала частичная относительность движения.

Эти проблемы были тесно связаны с другим типом двойственности, о котором мы упоминали на предыдущих страницах. И снова мы видели, что пространство-время изменялось под влиянием присутствия материи, и все же даже в отсутствие материи оно сохраняло свою структуру. Конечно, не все эти двойственности одинаково неприемлемы для всех мыслителей, но следует признать, что для тех, кто жаждет единства в природе, любые попытки устранить их будут приветствоваться.

Эйнштейн пытался сделать эту относительность инерции и движения радикальной еще до открытия своей цилиндрической вселенной. Он решил эту проблему, постулировав определенные граничные условия на окраине ядра звезд в бесконечном пространстве. Благодаря этим граничным условиям масса тела исчезала бы в бесконечности, вдали от материи. Но эти решения были отвергнуты, поскольку они, казалось, противоречили низким скоростям звезд. Однако с цилиндрической вселенной все эти трудности были преодолены, и по этой, среди прочих, причине она удовлетворяет естественную философскую потребность. Поскольку все эти соображения имеют тесную связь с механикой Маха, мы подробно обсудим значение идей Маха.

Как хорошо известно, из-за существования центробежной силы, инерциальной системы отсчета и прямолинейных траекторий, по которым движутся свободные тела в соответствии с законом инерции, Ньютон почувствовал себя вынужденным постулировать существование абсолютного пространства. Эйнштейн резюмирует позицию Ньютона в следующих строках:

«Чтобы иметь возможность рассматривать вращение системы, по крайней мере формально, как нечто реальное, Ньютон объективирует пространство... Существенно лишь то, что помимо наблюдаемых объектов, необходимо рассматривать как реальное нечто другое, что не воспринимается, чтобы ускорение или вращение можно было рассматривать как нечто реальное».

Противоположную позицию занял Мах, который пытался объяснить динамические проявления ускорения и вращения, не прибегая к этой сверхчувственной сущности, «абсолютному пространству». Вместо того, чтобы считать, что центробежная сила порождается вращением в абсолютном пространстве, он настаивал на том, что мы должны приписывать ее вращению по отношению к материальной вселенной в целом. Поскольку самое обширное скопление космической материи дается совокупностью звездных масс, из этого следует, что динамические эффекты будут порождаться вращением объекта

относительно звезд или, что сводится к тому же, вращением звезд относительно объекта. Фактически, эти две различные альтернативы представляют собой лишь разницу в терминологии, поскольку без абсолютного пространства, помимо звезд и материи в целом, не существует других терминов для сравнения.

Этому вращению относительно звездных масс можно было бы приписать выпуклость экватора, разбрызгивание воды в ведре Ньютона, разрыв быстро вращающегося маховика и т. д. Одним словом, все те динамические эффекты, которые, по мнению Ньютона, выдавали вращение в абсолютном пространстве, по мнению Маха выдают вращение относительно звездных масс Вселенной. Теперь должно быть очевидно, что относительность вращения Маха подразумевает нечто большее, чем просто кинематическое представление. Как он тщательно уточняет, эта активная роль звезд обусловлена не случайным обстоятельством, что они случайно видны, а вселенскими гравитационными воздействиями, которые возникают между материей и материей при наличии состояния относительного ускорения или вращения. Таким образом, силы инерции и центробежные силы больше не могут быть отнесены к внутренней структуре абсолютного пространства; теперь они становятся сродни гравитационным силам. Если бы звезды были невидимы, никаких изменений в динамических проявлениях не наблюдалось бы, но если бы их массы были уничтожены, если бы звезды перестали существовать (а не просто перестали светить), все характерные динамические эффекты исчезли бы; маховик не разорвался бы, вода не разбрызгалась бы и т. д. Точно так же эллиптические орбиты планет обусловлены гравитационным притяжением массы Солнца, а не, конечно, случайным обстоятельством, что Солнце случайно является светящимся, а не темным.

Из этих выводов следуют дальнейшие важные последствия; в частности, мы должны предположить, что инерционная масса тела должна генерироваться исключительно взаимными действиями, существующими между этим телом и другими телами Вселенной. Мы можем понять причину этого утверждения, если осознаем, что в случае уничтожения всех звезд исчезли бы все инерционные силы; но именно существование инерционной силы ответственно за усилие, необходимое для приведения тела в движение или для его остановки после начала движения. По этой причине исчезновение инерционных сил автоматически повлекло бы за собой исчезновение инерции или массы. Мы можем отметить контраст с взглядами Ньютона, поскольку в классической науке инерционные силы возникали из структуры самого абсолютного пространства, а масса рассматривалась как внутреннее свойство материи. В данном случае масса, как и вес, является относительной величиной; так как тело не имеет веса в отсутствие других тел, так и теперь мы видим, что, согласно Маху, оно также не имело бы инерционной массы, если бы находилось в одиночестве в пустом мире.

Когда мы рассматриваем механику Маха, мы видим, что ее конечным результатом стало отождествление абсолютного пространства Ньютона с пространством, определяемым звездами; абсолютное пространство стало, так сказать, материализованным. Мы можем получить более конкретное представление о новых идеях, представив себе перекрещивающиеся нити, простирающиеся между каждой отдельной звездой и всеми остальными. Вращение, которое развивает динамические эффекты, является, таким образом, вращением объекта относительно этой сети нитей; и, очевидно, не имеет значения, предполагать ли, что объект вращается среди нитей и звезд, или что нити и звезды вращаются вокруг объекта. Таким образом, инерциальная система отсчета — это любая система отсчета, в которой нити кажутся невращающимися.

Механика Маха может показаться слишком наивной. Мы можем согласиться с тем, что Солнце оказывает гравитационное воздействие на Землю, но предположить, что взрыв

маховика обусловлен наличием звездной вселенной, было бы, по-видимому, чрезмерным преувеличением. Тем не менее, следует помнить, что введение Ньютоном этой сверхчувственной сущности, абсолютного пространства, также было крайне неприятно для ряда мыслителей, так что речь идет о выборе меньшего из двух зол.

Эти идеи поддерживались Махом в течение ряда лет; и хотя они не могут претендовать на особую оригинальность, они всегда упоминаются под его именем. Позиция Маха настолько последовательно искажалась философами, что мы считаем оправданным предупредить читателя, упомянув некоторые ошибочные утверждения, которые были сделаны в ее отношении.

Два века назад Беркли отстаивал взгляды, которые имеют определенное поверхностное сходство с взглядами Маха. Он утверждал, что если бы не было звезд, постоянных точек сравнения на небе, мы не могли бы даже представить себе вращение Земли, и поэтому это вращение было бы лишено всякого смысла. На этот аргумент ньютонианцы ответили бы, что, в конце концов, не невозможно представить себе абсолютное вращение как вращение в жесткой желеобразной субстанции, называемой пространством. Кроме того, он добавил бы, что именно динамические факты, появление несимметрично распределенных сил, казалось бы, подтверждают абсолютную природу вращения. Абсолютное вращение было, таким образом, совершенно не имеющим отношения к нашему восприятию светящихся ориентиров на небесах или даже к нашей способности представить себе их существование. По мнению сторонников Ньютона, даже если бы звезды были полностью уничтожены, все равно было бы довольно легко определить, вращается ли Земля. Ряд экспериментов, таких как маятник Фуко, гироскоп и, в более общем плане, наличие центробежных сил на поверхности Земли, продемонстрировали бы существование этого абсолютного движения. По сравнению с этими аргументами позиция Беркли не дает никакого ответа. Только когда мы, вместе с Махом, утверждаем, что в случае уничтожения звезд эти показательные эффекты также исчезнут, только когда мы воспринимаем звезды не просто как визуальный объект или опору для воображения, но как источники причинного гравитационного воздействия, можно представить аргумент против абсолютного пространства Ньютона. Короче говоря, согласно Маху, за центробежную силу отвечает гравитационное воздействие всей материальной вселенной, включая звезды, видимые и темные, туманности, наше солнце, планеты и луны.

Прежде чем продолжить, необходимо обсудить ряд возражений. Можно утверждать, что, хотя Земля может быть представлена как вращающаяся среди звезд, совершенно невозможно считать, что звезды вращаются вокруг Земли, поскольку в этом случае центробежная сила заставила бы звезды разлететься в бесконечность. Критика такого рода возникает из-за путаницы между ньютоновским подходом и новым подходом. С точки зрения Ньютона этот аргумент был бы верным, поскольку звезды действительно описывали бы гигантские круги в абсолютном пространстве. Но в данном случае пространство самих звезд заняло место абсолютного пространства, поскольку именно в этом пространстве, обусловленном звездами, круговое движение порождает центробежные силы. И в своем собственном пространстве звезды, очевидно, находятся в покое, независимо от того, считаем ли мы, что они вращаются вместе со своим пространством вокруг Земли. Следовательно, центробежная сила не возникает на звездах, хотя она будет ощущаться на поверхности Земли (). Эквивалентным способом объяснения того же самого момента было бы сказать: звезды, вращающиеся вокруг Земли, не подвержены центробежной силе, поскольку они вращаются относительно ничего; масса Земли незначительна по сравнению с совокупной массой звезд.

Существует также другой тип возражений, основанный на причинности и нашем сознании усилия. Например, мы можем утверждать, что когда мы по своей воле вращаемся на пятке, мы прекрасно понимаем, что это наше тело вращается среди звезд, а не звезды вращаются вокруг нас. В поддержку нашего утверждения мы должны указать, что никакие наши слабые усилия не могли бы заставить звезды и туманности вращаться в обратную сторону. Любопытно, что когда выдвигаются возражения такого рода, критик часто полностью готов принять относительность скорости. Но, как указывает Эйнштейн, очень похожие аргументы могут быть выдвинуты и против этого более простого типа относительного движения. Например, не утверждал бы инженер, что движется именно его поезд, а не Земля, которая скользит назад? Не мог бы он также подкрепить свое утверждение, указав, что когда он перестает подавать топливо в топку, все движение в конечном итоге прекращается?

Возможно, более наглядную иллюстрацию относительности скорости можно получить, рассмотрев случай птицы в полете. Птица может осознавать свои усилия и понимать, что, когда она перестает махать крыльями, ее движение в атмосфере прекращается. Поэтому она вправе утверждать, что ее скорость поддерживалась ее собственными усилиями, а значит, была создана ею самой.

Но очевидно, что эта скорость, создаваемая птицей, будет не абсолютной скоростью в пространстве, а скоростью в атмосфере или относительной скоростью по отношению к атмосфере. Не зная ничего о ранее существовавшей скорости атмосферы в пространстве, птица не может знать ничего о своем собственном абсолютном движении; и это все, что утверждает принцип относительности скорости. Итак, если бы скорость атмосферы в пространстве была равна и противоположна относительной скорости птицы в атмосфере, усилия птицы привели бы к поддержанию ее тела в абсолютном покое. Следовательно, осознание усилия не является критерием существования абсолютного движения; речь идет только об относительном движении.

Точно такие же аргументы можно распространить на относительность вращения, за исключением того, что в этом случае мы сталкиваемся с особой трудностью, возникающей из-за существования центробежной силы. Позиция Маха устраняет эту трудность путем введения определенного физического допущения. Наша цель, конечно, не в том, чтобы оправдать механику Маха (поскольку это можно сделать только с помощью точных

экспериментов, а не общих разговоров), а лишь в том, чтобы показать, что она не приводит к абсурду, когда применяется аргумент, основанный на причинности.

Рассмотрим, что подразумевается в утверждении: «Мы знаем, что это мы вращаемся на пятке среди звезд, а не звезды вращаются вокруг нас». Когда проводится это различие между « », критик молчаливо предполагает, что существует сверхпространство, действующее как абсолютная система отсчета, по отношению к которой вращение приобретает значение « »; ведь в отсутствие такого предположения различие, которое он хочет защитить, было бы, конечно, бессмысленным.

Таким образом, утверждение сводится к следующему: «Мы знаем, что материальная вселенная не вращается в сверхпространстве; следовательно, когда мы начинаем вращаться на пятках по отношению к звездам, мы знаем, что это мы вращаемся в сверхпространстве, а звезды остаются в покое». Это была, по сути, позиция Ньютона, когда он отождествлял сверхпространство с абсолютным пространством. Но Ньютон, по крайней мере, придал физическое значение этой позиции, приписав центробежную силу вращению в этом абсолютном пространстве. Однако, когда мы следуем Маху и отвергаем физическое предположение Ньютона, абсолютное пространство лишается всякой возможности проявить себя физически. И таким образом, утверждение критика теряет всякое физическое значение, поскольку отныне единственным пространством, в котором вращение может проявить себя физически, является звездная система.

Метафизик, однако, может возразить, что интерпретация Махом центробежной силы не исключает существования сверхпространства, а лишь лишает нас возможности установить его существование физическими средствами. Признаем это утверждение и посмотрим, к чему оно нас приведет. Когда мы утверждаем, что это мы вращаемся на пятке, мы неявно предполагаем, что до нашего вращения Вселенная и наше тело не вращались в сверхпространстве. Если бы мы усомнились в правильности этого исходного предположения, то никаких выводов сделать было бы невозможно. Допустим, что изначально вселенная вместе с нашим телом вращалась по часовой стрелке в сверхпространстве; тогда в результате вращения против часовой стрелки на пятке теперь именно мы не вращались бы в сверхпространстве, в то время как вселенная звезд продолжала бы вращаться. Следовательно, звезды вращались бы вокруг нас. Таким образом, мы видим, что в соответствии с нашими первоначальными предположениями о состоянии вращения нашей вселенной в сверхпространстве мы могли бы сделать любые выводы, которые нам заблагорассудится. Проблема сводится, таким образом, к определению точного вращательного движения нашей вселенной в сверхпространстве. Теперь, поскольку это вращение не может проявиться каким-либо физическим образом, поскольку центробежная сила уже была учтена, проблема, конечно, никогда не может быть решена физиком. Что же касается метафизика, то, если он не может предоставить нам какие-либо сверхфизические средства для определения истинного положения, он также будет неспособен предоставить нам необходимую информацию. Отсюда следует, что если принять предпосылки Маха, то вся концепция сверхпространства теряет смысл, поскольку в отношении нее можно безнаказанно делать любые предположения.

Короче говоря, взгляды Маха не противоречат причинности, поскольку мы всегда можем сказать, что наши усилия были приложены к нашему телу, а не к звездам. Но мы должны признать, что наши усилия привели наше тело во вращение относительно звездного пространства, *а не относительно пространства, которое выходит за пределы существования материальной вселенной.*

Теперь, хотя ряд мыслителей симпатизировали позиции Маха, поскольку верили, что любое движение в совершенно пустой вселенной не может иметь смысла, физические трудности, с которыми сталкивалась его идея, были настолько велики, что классическая наука никогда не воспринимала ее всерьез. Эйлер отверг возможность любого такого звездного воздействия, и даже совсем недавно Планк критиковал Маха за его позицию. Дело не в том, что в теории возможные звездные воздействия должны быть исключены на основании общих принципов; ведь физика познакомила нас с внешними воздействиями подобного рода, наиболее известным из которых является гравитационное воздействие Солнца на планеты. Кроме того, когда мы хотим разрезать ножом кажущееся пустым пространство, мы можем столкнуться со значительными трудностями, если это пространство пронизывается сильным магнитным полем. Поэтому мы не можем исключить возможность того, что звезды каким-то образом генерируют поле, наделяющее пространство структурой, которую мы ошибочно принимали за абсолютную внутреннюю структуру пространства. Однако наука не может довольствоваться расплывчатыми качественными аналогиями; и прежде чем можно будет рассматривать такую механику, как у Маха, необходимо успешно объяснить существование центробежной и кориолисовой сил, действующих на тело, вращающееся относительно звезд. Это объяснение должно было быть дано *не только в виде неясных качественных аналогий, но и в количественном выражении с высокой степенью точности*. Таковы, в действительности, требования, которым должны удовлетворять все гипотезы в физике. Однако все, что сделал Мах, — это постулировал возможное влияние звезд; он даже не попытался строго обосновать свои идеи. Более того, даже если бы он исследовал эту проблему более глубоко, он потерпел бы неудачу, поскольку в его время пространство-время было неизвестно.

Кроме того, идеи Маха представляли непреодолимые трудности. Закон всемирного тяготения Ньютона гласил, что притяжение между телами зависит исключительно от их масс и взаимного расстояния; условия относительного движения или покоя тел считались несущественными. Но если принять идеи Маха, то мы должны предположить, что в дополнение к обычному ньютоновскому притяжению должно возникнуть дополнительное поле притяжения, о котором до сих пор не подозревали, если тела находятся в состоянии относительного ускорения, как в случае звезд, вращающихся вокруг Земли, или планет, движущихся вокруг Солнца.^[115] Таким образом, механика Маха повлекла бы за собой падение ньютоновского закона гравитации. Когда Мах предложил свою механику, закон Ньютона казался косвенно оправданным благодаря точности, с которой он позволял математикам предсказывать многочисленные астрономические явления (за исключением, возможно, движения Меркурия и некоторых лунных возмущений). Кроме того, закон обратной пропорциональной квадрату силы притяжения материи к материи был подтвержден прямыми измерениями в лаборатории в ходе так называемого эксперимента Кавендиша. Насколько это можно было определить с помощью эксперимента, не было никаких следов увеличения массы тела при размещении других тел в его близости; следовательно, в этом отношении казалось невозможным обнаружить изменения массы, требуемые механикой Маха. Что касается попытки повторить эксперимент Кавендиша с взаимно ускоряющимися массами, то технические трудности сделали его успех невозможным. По всем этим причинам большинство ученых с крайним подозрением относились к теории относительности вращения Маха.

Но когда мы рассматриваем теорию относительности, ситуация меняется. Во-первых, закон всемирного тяготения Ньютона оказывается лишь приблизительным, а относительное движение между телами изменяет их кажущееся взаимное притяжение. Само по себе это, конечно, недостаточно для обоснования механики Маха, но когда мы исследуем последствия, вытекающие из цилиндрической модели Вселенной Эйнштейна, мы

обнаруживаем, что взгляды Маха в конце концов могут оказаться правильными.^[116] Однако прежде чем обсуждать этот аспект теории Эйнштейна, мы должны упомянуть, что даже в классической науке относительность ускоренного и вращательного движения могла быть принята в ограниченном смысле для механических явлений.

Рассмотрим, например, Землю, вращающуюся среди звезд. Пространство, определяемое системой отсчета, привязанной к Земле, будет пронизываться полем центробежных и кориолисовых сил. Теперь мы всегда можем считать Землю невращающейся, а звезды вращающимися вокруг нее, при условии, что мы сохраним существование этого особого поля сил. Если мы считаем, что это поле простирается за пределы звезд, то расчеты показывают, что под действием этих сил звезды, несомненно, вращались бы вокруг Земли, как это и происходит. Таким образом, в этой степени относительность вращения, когда она ограничивается механическими явлениями, может быть защищена в классической науке. Общий принцип относительности идет еще дальше, позволяя нам распространить эту относительность вращения на все виды явлений — оптические и электромагнитные, а также механические. Но даже в этом случае относительность вращения не является радикальной, поскольку мы сделали ее возможной только благодаря сохранению этого любопытного поля силы, окружающего Землю; и естественно возникает вопрос: откуда берет начало это поле? Ньютон ответил: «От вращения в абсолютном пространстве». Эйнштейн ответил бы: «От вращения в абсолютном пространстве-времени». Другими словами, гипотеза об абсолютном пространстве, обладающем динамическими свойствами *как таковыми*, поддерживалась как классической наукой, так и теорией относительности до того, как Эйнштейн выдвинул свои предположения о форме Вселенной. В таком случае считать Землю невращающейся было просто математической фикцией.

Когда Эйнштейн сформулировал свой постулат эквивалентности, классическая концепция центробежной силы, возникающей в результате вращения в абсолютном пространстве, вызвала серьезные трудности. Постулат эквивалентности утверждал, что силы инерции и гравитации имеют одинаковую природу, но из этого следовало, что они должны иметь одно и то же происхождение. Но гравитация, как мы знаем, обусловлена материей; следовательно, в мире, полностью лишенном материи, не могло бы быть такого явления, как гравитация. Но тогда, согласно выводам, сделанным из постулата эквивалентности, не должно было бы быть и таких явлений, как силы инерции, центробежные силы и инерционная масса. Из этого следовало бы, что если бы какое-то крошечное испытательное тело вращалось в пустой вселенной, на его экваторе не наблюдалось бы никаких следов центробежной силы. Таким образом, мы видим, как постулат эквивалентности, выведенный из хорошо установленной тождественности двух типов масс и составляющий отправную точку теории гравитации Эйнштейна, неизбежно приводит нас к взглядам, схожим с взглядами Маха.

Постулат эквивалентности также указывает на цилиндрическую вселенную; ведь если мы примем гипотезу о бесконечной квазиевклидовой вселенной с ядром из звезд, то нам придется предположить, что край вращающегося диска достаточно больших размеров может простираться далеко за пределы самых дальних звезд ядра. Однако чем больше диск и чем дальше его край от звезд, тем больше будет центробежная сила, действующая на край. Казалось бы, источник центробежной силы следует искать в пустых областях в бесконечности, так что эта сила никогда не может быть отнесена к звездной материи, сконцентрированной в ядре. Другими словами, гравитация существовала бы только в ядре и вокруг него, тогда как силы инерции существовали бы повсюду и имели бы свой источник в бесконечности. Такая концепция не только была бы крайне неудовлетворительной, поскольку переносила бы в бесконечность причины сил, которые мы наблюдаем на

конечных расстояниях, но и, по-видимому, находилась бы в полном противоречии с выводами, сделанными из постулата эквивалентности, устанавливая, как это было бы, двойственность между природой инерции и гравитации.

Кажется, есть только один способ устранить эти трудности, а именно принять гипотезу Эйнштейна о цилиндрической вселенной, полностью обусловленной материей. В этой самодостаточной вселенной диск, если бы он был бесконечно протяженным, в конце концов свернулся бы вокруг себя, охватывая всю вселенную; его край никогда не простирался бы до пространственной бесконечности. Расчеты показывают, что по мере постепенного расширения диска центробежная сила на крае сначала будет расти, затем уменьшаться и, наконец, снова исчезнет. Таким образом, будет устранена неприятная необходимость удаления причины центробежной силы в бесконечность; центробежная сила, как и гравитация, будет проследиваться до пространственной структуры вселенной и, следовательно, до присутствия материи на конечных расстояниях.

Следует отметить, что эти взгляды приводят нас к цилиндрической вселенной Эйнштейна, а не к вселенной де Ситтера. Ведь вселенная де Ситтера, в отличие от вселенной Эйнштейна, может существовать без всякой материи; центробежная сила и инерция присутствовали бы в ней даже при полном отсутствии материи и гравитации. Таким образом, она не удовлетворяла бы требованиям, вытекающим из постулата эквивалентности масс и энергии (); поскольку, как и в бесконечной вселенной, центробежная сила и инерция в целом казались бы не связанными с материей, а значит, и с гравитацией.

Все аргументы, обсужденные в предыдущих параграфах, свидетельствуют о том, что теория Эйнштейна незаметно вела нас к механике Маха и цилиндрической форме Вселенной; эти две вещи, хотя и кажутся не связанными между собой, на самом деле оказываются тесно связанными. Но было бы большой ошибкой предполагать, что Эйнштейн *априори* намеревался оправдать взгляды Маха. Любой, кто следил за изложенными аргументами, поймет, что Эйнштейн не втискивает природу в какую-то заранее заданную форму. Но даже на этом этапе мы еще не обсудили более веские причины, которые в конечном итоге заставили его симпатизировать механике Маха. Сейчас мы исправим это упущение.

Гравитационные уравнения Эйнштейна без члена λ , т. е. уравнения, применимые к бесконечной вселенной, а именно $G_{ik} = 0$, получили блестящую поддержку, позволив ему объяснить движение планеты Меркурий и предсказать такие неожиданные явления, как двойное преломление луча света и эффект Эйнштейна. Поэтому было вполне естественно попытаться извлечь из этих уравнений все остальные сокровища, которые они содержали. Но здесь математиков ждали интегралы чрезвычайно сложного характера.

Когда уравнения были обработаны очень приблизительно, они дали закон всемирного тяготения Ньютона и сдвиг Эйнштейна. Когда приближение было увеличено, они дали двойное искривление луча света. Когда приближение было увеличено еще больше, мы получили прецессионное опережение перигелия Меркурия. При более общем подходе они позволили Эйнштейну предсказать, что гравитация будет распространяться со скоростью света. Затем Тирринг взялся за уравнения, доведя свои вычисления до еще более высокой степени приближения, и, наконец, проявились эффекты, необходимые для механики Маха. Тирринг обнаружил, что вращение центрального тела изменяет характер его притяжения к окружающим его планетам или спутникам. (Эти предположения, по-видимому, поддаются астрономической проверке в случае Юпитера и одного из его спутников.) Но самое главное,

он обнаружил, что вера Маха в гравитационное влияние звезд, вращающихся вокруг неподвижного тела, в конечном итоге оправдалась. В частности, уравнения доказали, что даже в гипотезе бесконечной вселенной вращение материи создает вокруг испытываемого тела поле силы, располагающееся точно так же, как центробежная и кориолисова силы в пространстве, привязанном к вращающемуся телу. Кроме того, на массу испытываемого тела будет влиять близость окружающей материи (). Однако последнее следствие можно получить без сложных вычислений.^[117]

Теперь гравитационные уравнения, которые дали эти интересные результаты, конечно же, не были подделаны с единственной целью оправдать идеи Маха. Как объяснялось в предыдущих главах, они были открыты Эйнштейном в результате совершенно другого хода мыслей, задолго до того, как вообще была рассмотрена относительность вращения. Следовательно, нельзя отрицать, что, подтвердив, как они это сделали, правильность идей Маха, был установлен факт чрезвычайной важности. Механика Маха наконец получила то рациональное обоснование, которого до сих пор не хватало, и было получено первое представление о возможной физической связи между происхождением инерции и гравитацией. Однако важно отметить, что, хотя с качественной точки зрения согласие было полным, при количественном рассмотрении проблемы вычисления показывают, что увеличение массы и центробежные силы, создаваемые вращением звезд, дают лишь ничтожную долю величин, наблюдаемых на практике. Чтобы получить величины, соответствующие наблюдениям, необходимо было бы предположить, что звезд в много - триллион раз больше, чем мы полагали, и это предположение привело бы нас к другим трудностям.

Причину этого несоответствия нетрудно обнаружить. Как известно, центробежная сила возникает, когда тело отрывается от геодезической линии пространства-времени, которой оно было бы вынуждено следовать под действием метрического поля. Следовательно, утверждение, что вращение небосвода вокруг испытываемого тела повлияет на поле силы, окружающее тело, равносильно утверждению, что вращение звезд может повлиять на распределение метрического поля вокруг тела и увлечь за собой геодезические линии. Нет никаких оснований удивляться тому, что такой эффект имеет место, учитывая, что явление гравитации подразумевает, что материя, находящаяся в покое или в движении, должна влиять на кривизну пространства-времени, а значит, и на расположение метрического поля. Но, с другой стороны, до того, как Эйнштейн открыл цилиндрическую вселенную, действие материи могло только изменять расположение уже существующего метрического поля, но не могло создавать такое поле из ничего. Пространство-время само по себе считалось плоским, и материя могла только придать ему определенную степень кривизны. В результате большая часть центробежной силы объяснялась внутренней структурой плоского пространства-времени, и только бесконечно малая часть этой силы могла быть отнесена к дополнительному воздействию звезд (). Таким образом, центробежная сила, по крайней мере в основном, по-прежнему свидетельствовала об абсолютном вращении в пустом, абсолютном пространстве-времени.

Тем не менее, был установлен важный момент. Идеи Маха, хотя и опровергнутые количественно, казались приемлемыми качественно, в то время как в классической науке они казались совершенно невозможными с любой точки зрения. Был забит тонкий конец клина. С этого момента стало допустимым предположить, что с ростом нашего понимания Вселенной будет установлена полная относительность всех движений, не только качественно, но и количественно. Другими словами, не только бесконечно малая часть центробежной силы и массы, но и их совокупность может быть объяснена взаимодействием материи и материи. Легко понять, как это достижение будет реализовано.

Все, что нам нужно было бы сделать, — это предположить, что совокупность метрического поля, а не только его часть, была создана распределением материи по всей вселенной. Как мы видели, это условие точно соответствует цилиндрической вселенной; таким образом, в вселенной Эйнштейна идеи Маха могут быть оправданы, а страшилище абсолютного вращения рассеяно.^[118]

Как вселенная де Ситтера, так и квазииневклидова вселенная были бы несовместимы с механикой Маха, поскольку в любой из этих вселенных метрическое поле и геодезические линии пространства-времени существовали бы при полном отсутствии материи. Это означает, что в пустом мире де Ситтера и далеко за пределами ядра звезд в квазииневклидовой вселенной тела подвергались бы силам инерции, когда они отрывались от своих естественных геодезических мировых линий. В любом случае пространственно-временная пустота казалась бы наделенной динамическими свойствами даже в отсутствие всякой материи.

Следующий отрывок, цитируемый из работ Эйнштейна, выражает его взгляды на эту тему:

«Идея, высказанная Махом, что инерция зависит от взаимного действия тел, в первом приближении содержится в уравнениях теории относительности. Из этих уравнений следует, что инерция зависит, по крайней мере частично, от взаимного действия масс. Поскольку предположение о том, что инерция зависит частично от взаимного действия и частично от независимого свойства пространства, является неудовлетворительным, идея Маха приобретает большую вероятность. Но эта идея Маха соответствует только конечной вселенной, ограниченной в пространстве, а не квазииневклидовой бесконечной вселенной. С точки зрения эпистемологии более удовлетворительным является предположение, что механические свойства пространства полностью определяются материей, и это имеет место только в ограниченной пространством вселенной» ().

Здесь можно выдвинуть ряд возражений. Можно утверждать, что если мы предположим, что Земля не вращается, то нам придется приписать звездам скорости, превышающие скорость света. Ответ на это возражение, по-видимому, будет аналогичным тому, который был дан при обсуждении центробежной силы, действующей на вращающиеся звезды. Мы видели, что звезды в целом можно рассматривать как вращающиеся вокруг Земли только в чисто формальном смысле, поскольку именно скопление звезд создает метрическое поле, а значит, и пространство; Земля же является лишь эпизодом в этой созданной звездами вселенной. Грубо говоря, мы можем сказать, что звезды всегда находятся в покое в универсальном пространстве, которое они сами создали; и это верно независимо от того, считаем ли мы это пространство вращающимся в каком-то вымышленном внешнем пространстве.

Но есть еще одно возражение, которое, по крайней мере для автора, кажется имеющим некоторое значение. Предположим, что все звезды были уничтожены в определенный момент времени в нашей земной системе отсчета. Гравитационное возмущение, вызванное этим уничтожением, потребует нескольких лет, чтобы достичь нас, поскольку гравитационные возмущения распространяются со скоростью света. Следовательно, метрическое поле, или пространственно-временная структура, вокруг Земли будет сохраняться в течение значительного времени. Таким образом, в течение нескольких лет центробежная сила будет по-прежнему проявляться. Учитывая этот факт, мы должны принимать во внимание не текущее положение звезд, а текущее состояние метрического

поля. Это приводит нас к более дуалистическому взгляду, учитывающему как поле, так и материю. Такова, по-видимому, позиция Вейля, когда он пишет:

«Падение стаканов в вагоне-ресторане, проходящем по крутому повороту, и разрыв быстро вращающегося маховика, согласно только что высказанному мнению, не являются следствиями «абсолютного вращения», как утверждал бы Ньютон, существование которого мы отрицаем; они являются следствиями метрического поля. Поскольку состояние направляющего поля не сохраняется, а настоящее состояние возникло из прошлых под влиянием существующих в мире масс, а именно фиксированных звезд, то упомянутые выше явления являются частично следствием фиксированных звезд, *относительно которых* происходит вращение... Мы говорим «частично», потому что распределение материи в мире не определяет «направляющее поле» однозначно, поскольку оба они **в один момент** независимы друг от друга и случайны (аналогично заряду и электрическому полю)».

В настоящее время все эти вопросы, касающиеся формы Вселенной, по-прежнему остаются в значительной степени спекулятивными; и нам не следует удивляться тому, что наиболее авторитетные ученые, такие как Эйнштейн, Вейль, Эддингтон, Сильберштейн и Тирринг, проявляют разные тенденции в соответствии со своим темпераментом. Эддингтон проявляет предпочтение к Вселенной де Ситтера. Если принять эту вселенную, то идеи Маха будут опровергнуты, поскольку центробежные силы будут генерироваться в пустом пространстве-времени, лишенном всякой материи, и звезды будут иметь к ним очень малое отношение. Де Ситтер, конечно, защищает свою собственную модель вселенной и упрекает Эйнштейна в том, что тот возродил своего рода ньютоновское абсолютное пространство, материализовав инерциальную систему отсчета, по отношению к которой измеряются вращение и ускорение. Нет ни малейшего сомнения (), что цилиндрическая вселенная достигает этого результата, связывая существование инерциальной системы отсчета с постоянным распределением звезд. Но, по мнению многих, это одно из ее величайших преимуществ, поскольку оно приводит к физической относительности всех движений. В конце концов, мы не можем отрицать существование центробежной силы и сил инерции; и, безусловно, более удовлетворительно объяснять эти силы с точки зрения ускорения материи по отношению к материи, чем с точки зрения ускорения по отношению к тому вакууму, который мы называем пустым пространством-временем. Но эти расхождения во мнениях возникают из чисто эмоциональных соображений, и важно отметить, что они касаются главным образом самых высоких надстроек теории; они никоим образом не опровергают ее сущность и основные достижения.

Конечно, было бы чрезвычайно интересно решить вопрос о форме Вселенной, обратившись к астрономическим наблюдениям, и весьма вероятно, что в относительно короткое время эта проблема будет решена.

Подводя итог, мы имеем три возможные гипотезы для рассмотрения:

1. Бесконечная вселенная пространства с ядром из звездной материи, в которой механика Маха была бы невозможна. Тогда нам пришлось бы считать, что пустота обладает динамическими свойствами и структурой, независимо от наличия материи.

2. Вселенная Де Ситтера, которая также противоречила бы идеям Маха и имела бы те же неудовлетворительные особенности, что и первая гипотеза. Кроме того, она была бы нестабильной.

3. Наконец, цилиндрическая вселенная Эйнштейна, которая была бы стабильной и из которой были бы устранены все упомянутые неприятные особенности.

Если бы мы могли уничтожить все звезды, у нас был бы способ решить эту проблему, поскольку во вселенной Эйнштейна результатом было бы полное исчезновение массы и центробежной силы. Фактически, это привело бы к полному хаосу, поскольку метрическое поле пространства-времени исчезло бы, и лучи света и свободные тела больше не знали бы, как двигаться. Но поскольку уничтожение звезд выходит за рамки возможного, мы должны прибегнуть к другим методам. Таким образом, мы подходим к рассмотрению вопроса о стабильности. Правда ли, что звезды находятся в состоянии статистического равновесия? Правда ли, что их скорости всегда малы по сравнению со скоростью света? Эддингтон высказывает некоторые сомнения по поводу этой стабильности, отмечая, что спиральные туманности, по-видимому, движутся с огромными скоростями. Этот факт в сочетании с явным покраснением их света заставляет его отдать предпочтение вселенной де Ситтера. Но существует еще один метод решения этого вопроса.

Мы помним, что первоначальный закон гравитации Эйнштейна в случае бесконечной Вселенной в некоторых отношениях отличался от закона Ньютона, и что эти различия были достаточно значительными, чтобы быть обнаруженными в пределах Солнечной системы благодаря их влиянию на движение Меркурия и двойное искривление луча звездного света. Но если теперь мы предположим, что Вселенная конечна, и, следовательно, включим в гравитационные уравнения член λg_{ik} , то расчеты показывают, что последует дальнейшая модификация. Это будет похоже на то, как если бы все пространство вокруг звезды было заполнено отрицательной или отталкивающей материей очень низкой плотности, того же порядка, что и кривизна Вселенной. Влияние этого искусственного распределения отрицательной массы будет заключаться в уменьшении нормального значения притяжения звезды; это уменьшение, благодаря кумулятивному эффекту, производимому распределением, будет становиться все более и более заметным по мере того, как мы будем рассматривать точки, удаленные от звезды. Разумеется, эта дополнительная модификация закона гравитации будет невероятно малой из-за крошечности кривизны мира и, следовательно, плотности распределения отрицательной массы. Было бы бесполезно надеяться обнаружить ее, если мы не будем изучать гравитационные явления, происходящие на огромных астрономических пространствах. Но этот эффект можно наблюдать следующим образом:

Рассмотрим, например, гравитирующие массы, такие как Солнце и его планеты. Мы знаем, что солнечная система не разрушается и все планеты не падают на Солнце потому, что планеты находятся в движении (по отношению к инерциальной системе отсчета, привязанной к Солнцу). Существует определенная математическая зависимость между скоростью планеты по определенной орбите и силой гравитации, которой она подвергается со стороны Солнца. Чем больше скорость, тем больше должно быть притяжение Солнца, чтобы удержать планету на ее орбите. Теперь шаровые скопления звезд и Млечный Путь составляют именно такие постоянные гравитационные системы огромных размеров. Отдельные звезды притягивают друг друга, и их средние скорости позволяют нам вывести результирующие гравитационные силы, которым они должны подвергаться. Следовательно, если при применении оригинального закона гравитации Эйнштейна (соответствующего бесконечной вселенной) ^[119] мы обнаружили, что средние скорости звезд в Млечном Пути меньше, чем ожидалось, мы могли бы считать доказанным, что закон притяжения должен ослабевать быстрее, чем указывал оригинальный закон Эйнштейна. Это несоответствие оправдало бы нашу веру в конечность вселенной. Значение λ , являющееся причиной этого несоответствия, можно было бы установить, а вместе с ним, конечно, и значение вселенской кривизны. Зная кривизну, мы могли бы определить размер Вселенной, среднюю плотность материи и, наконец, общую массу Вселенной. Эйнштейн

считает, что астрономические наблюдения такого рода в конечном итоге разрешат этот вопрос.

Мы исчерпали основные моменты, которые побудили Эйнштейна поверить в конечность Вселенной, но есть и другие, связанные с возможностью свести материю к электричеству и гравитации. Мы коснемся этого дополнительного аспекта вопроса в одной из следующих глав.^[120] На данный момент мы можем перейти к совершенно другому типу проблемы, также связанной с конечностью Вселенной. Мы имеем в виду стандарт калибровки.

Как указывает Эддингтон, когда наши уравнения доказывают нам, что вселенная пространства должна быть сферической и иметь постоянную кривизну, что еще это может означать, кроме того, что если мы измерим радиус кривизны с помощью материального стержня, то получим одинаковую величину во всех направлениях? Но тогда следует, что радиус вселенной в любом направлении составляет калибр длины, который навязывает нам природа; и что все тела в равновесии автоматически приспосабливаются так, чтобы сохранять определенную долю длины этого радиуса, в каком бы направлении они ни были расположены. Эта точка зрения предполагает, что для того, чтобы материальные тела имели определенный масштаб размеров, должна существовать кривизна мира. Эддингтон также предполагает, что, поскольку конечная вселенная открыта во времени, но ограничена в пространстве, можно дать возможное объяснение кажущейся постоянности существования определенных сущностей, таких как электроны и атомы, которые ограничены в пространственном расширении, но вечны во времени. Теория Вейля проливает дополнительный свет на эти довольно гипотетические проблемы.

Конечная вселенная знакомит нас с трудным понятием сферического пространства. Мы уже обсуждали этот тип пространства в предыдущей главе, но, учитывая его дополнительную важность, теперь, когда реальная вселенная, по-видимому, является таковой, возможно, стоит заново рассмотреть эту проблему.

Сначала рассмотрим двумерную аналогию. Если на двумерной поверхности сферы мы проводим измерения с помощью крошечных жестких евклидовых стержней, мы получаем числовые результаты не евклидовой, а римановой двумерной геометрии. Соответственно, мы говорим, что геометрия сферической поверхности является римановой, а риманово пространство является искривленным и конечным. Но слово «искривленное» сразу же вызывает представление о третьем измерении, по которому искривляется поверхность или пространство. В данном двумерном случае нам несложно представить себе это третье измерение, поскольку пространство нашего реального опыта является трехмерным. Итак, мы отмечаем, что сферическая поверхность имеет внешнюю и внутреннюю стороны, и что, если мы рассматриваем только точки на поверхности, мы исключаем из нашего исследования неопределенное количество точек пространства как внутри, так и снаружи сферы. Эта процедура неудачна, потому что, когда мы обобщаем нашу предыдущую двумерную иллюстрацию на трехмерное сферическое пространство, мы склонны рассуждать по аналогии и представлять себе, или пытаться представить себе, четырехмерное евклидово пространство, в которое должно быть встроено наше трехмерное евклидово пространство. В результате мы думаем о точках пространства за пределами нашего пространства, как будто наше пространство не воплощает в себе все пространство.

В данном случае такое отношение было бы совершенно ошибочным, но вина лежит на особом типе двумерной аналогии, которую мы решили представить. Чтобы устранить эту ошибку, давайте поступим так, как объяснялось в предыдущей главе, и предположим, что сфера лежит своим южным полюсом на бесконечной евклидовой плоскости, а точка света расположена на ее северном полюсе. Если сфера прозрачна, наши крошечные стержни,

смещенные на сферической поверхности, будут отбрасывать свои тени на плоскость; и, конечно, если мы будем производить измерения на плоскости с помощью этих теней наших стержней, мы получим точно такие же метрические соотношения на плоскости, как и ранее на сферической поверхности. В частности, если сто крошечных стержней, лежащих вдоль меридиана, охватывают расстояние от южного до северного полюса нашей сферы, то сто теней этих крошечных стержней будут простирались по плоскости до бесконечности. Точно так же, как конечное число почтовых марок покрыло бы поверхность сферы, так и теперь конечное число теней, теней этих марок, покрыло бы всю бесконечную протяженность плоскости. Таким образом, мы видим, что при измерении с помощью наших теней плоскость будет конечной, а ее геометрия — римановой, тогда как она была бы бесконечной и евклидовой, если бы мы проводили наши измерения, перемещая обычные линейки по ее поверхности.

Преимущество представления проблемы таким альтернативным способом заключается в том, что в данном случае введение третьего измерения больше не является необходимым для объяснения кривизны или неевклидовости. Мы понимаем, что независимо от того, считать ли пространство плоскости конечным и римановым или бесконечным и евклидовым, в обоих случаях включаются точно те же самые точки пространства. Эта двумерная иллюстрация, конечно, может быть расширена до трех измерений. Следуя той же линии рассуждений, мы скажем, что вселенная трехмерного пространства бесконечна, если, располагая рядом, в рядах, столбцах и наложенных слоях, бесконечное количество конгруэнтных кубов, мы обнаружим, что можно продолжать складывать их вечно и бесконечно. С другой стороны, мы скажем, что вселенная пространства конечна, если этот процесс не может продолжаться бесконечно, то есть если после наложения конечного числа кубов дальнейшее продвижение невозможно. Последний случай, конечно, похож на тот, который мы обсуждали ранее, когда мы обнаружили, что невозможно разместить бесконечное число теней наших почтовых марок на плоскости.

Из этих примеров видно, что конечность или бесконечность нашего пространства зависит от геометрического поведения кубов, которые мы считаем конгруэнтными или равными. С чисто математической точки зрения, поэтому, проблема конечности Вселенной не может иметь абсолютного значения, поскольку конгруэнтность, или равенство размеров, не может быть определена каким-либо абсолютным образом. Однако с точки зрения физика эта проблема приобретает очень определенное значение, поскольку, хотя единственное *рациональное* определение конгруэнтности невозможно, *эмпирическое* определение легко получить. Под конгруэнтными кубами физик подразумевает те, которые визуально и тактильно будут выглядеть одинаково в любой области пространства, в которой они могут находиться, при условии, что наблюдатель сопровождает кубы в их перемещениях. Он имеет в виду кубы, вырезанные из вещества тех тел, которые люди с незапамятных времен согласились считать неизменными твердыми телами и которые иллюстрируются телами вокруг нас, когда они поддерживаются в условиях постоянной температуры и давления.

Поэтому, согласно Эйнштейну, именно в отношении таких тел или, опять же, в отношении траекторий лучей света вселенная проявляет себя как конечная. Это всего лишь другой способ сказать, что наши тела ведут себя как римановы тела (по крайней мере, на обширных пространствах), а не как евклидовы, как считалось ранее.

Подводя итог, мы видим, что эта же самая так называемая конечная вселенная проявляла бы себя как бесконечная, если бы наши стержни вели себя евклидово, откуда мы можем сделать вывод, что вселенная, будь она конечной или бесконечной, может содержать точно такие же области пространства, как и наша плоскость содержала те же точки, измеряемые линейкой или тенью. Поэтому предположение, что определенные области

пространства должны быть обязательно исключены из-за конечности вселенной, было бы позицией, никоим образом не требуемой фактическими условиями задачи.

ГЛАВА XXXV

ВАЖНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В ходе этой книги мы видели, как ряд трудностей был преодолен, как только мы признали существование четырехмерного пространства-времени вместо мира отдельного пространства и времени классической науки. Однако есть и другие аспекты этой проблемы, и мы сейчас кратко упомянем о них.

Во-первых, все векторы, такие как скорости и силы, и все тензоры, такие как напряжения электромагнитного поля Максвелла, ранее выраженные в трехмерном пространстве, теперь должны быть расширены и дополнены дополнительными компонентами, чтобы получить векторы и тензоры в четырехмерном пространстве-времени. Эти новые компоненты не определяют новые физические величины, неизвестные классической науке; в общем случае они дают нам хорошо известные величины, такие как работа, мощность и т. д. В качестве примера рассмотрим электрическую и магнитную интенсивности. В классической науке это были совершенно разные величины. Но когда мы представляем эти интенсивности в терминах пространства-времени, мы обнаруживаем, что они задаются различными компонентами *одного и того же* тензора пространства-времени F_{ik} ; временные компоненты дают электрическую силу, а пространственные компоненты дают магнитную силу. Преимущество новой точки зрения заключается главным образом в том, что она показывает нам, что то, что мы когда-то считали разными сущностями, теперь оказывается разными компонентами одного и того же существующего пространства-времени. Тогда становится очевидной причина наблюдаемых связей между этими разными сущностями.

В частности, рассмотрим случай уравнений электродинамики. При изучении электричества и магнетизма мы можем рассматривать явления, в которых условия не меняются с течением времени; электрические заряды и магниты остаются в покое, а токи, протекающие по неподвижным проводам, не меняют свою интенсивность. В этом случае условия называются стационарными; как будто время не играет никакой роли. Законы, которые управляют этим типом явлений, были открыты эмпирически более века назад и выражены математически в терминах пространственных векторов. Проблема определения поведения электрических и магнитных явлений при прекращении стационарности условий не могла быть предсказана; для получения общих законов были необходимы дальнейшие экспериментальные исследования. Даже в этом случае трудности были значительными, и потребовался гений Максвелла, чтобы установить законы на основе неполного набора экспериментальных данных, имевшихся в то время. Вся эта работа продолжалась почти столетие; она была медленной и трудоемкой.

Однако, если бы люди осознали, что наш мир представляет собой четырехмерное пространство-время Минковского, а не отдельное пространство и время, то все было бы совсем иначе (). Распространив хорошо известные стационарные законы на четырехмерное пространство-время, просто добавив временные компоненты к различным тройкам пространственных, мы бы невольно сформулировали законы, управляющие изменяющимися полями, или, другими словами, мы бы построили знаменитые уравнения Максвелла. Электромагнитная индукция, открытая экспериментально Фарадеем, дополнительный электрический член, введенный Максвеллом в качестве гипотезы,

радиоволны, все в электромагнетизме поля, могло быть предсказано одним росчерком пера. Было бы сэкономлено столетие кропотливых усилий.^[121]

Интересно также отметить, что четыре отдельных соотношения, составляющих уравнения электромагнетизма Максвелла, теперь объединены в два; и громоздкий вид уравнений сменился формами большой простоты.

Еще одно упрощение, которое дало нам открытие пространства-времени, можно увидеть, когда мы изучаем принципы сохранения энергии и импульса. Мы обнаруживаем, что эти два разных принципа на самом деле составляют один. Сохранение энергии дается временной компонентой, а сохранение импульса — тремя пространственными компонентами одного и того же тензорного закона сохранения пространства-времени.

В общем случае все задачи динамики или кинематики в трехмерном пространстве можно рассматривать как задачи статики в четырехмерном пространстве-времени. Все эти преимущества пространства-времени очень привлекательны для теоретического исследователя, который имеет дело с математическими уравнениями; но все они показывают, насколько проще понять работу Вселенной, когда мы осознаем, что фундаментальным континуумом мира является пространство-время, а не отдельное пространство и время.

Теперь мы должны упомянуть еще одно важнейшее понятие классической науки, а именно **действие**; и мы увидим, что эта важная математическая величина совершенно естественным образом находит свое место в мире пространства-времени. Чтобы понять значение действия, рассмотрим любую механическую систему, переходящую из начальной конфигурации P в конечную конфигурацию Q . Классическая наука определила действие A этой системы как разницу между ее полной кинетической энергией T и полной потенциальной энергией V , взятой в каждый момент времени и затем суммированной за весь период времени, в течение которого система перешла из начального состояния P в конечное состояние Q .^[122]

Теперь полная кинетическая и потенциальная энергии системы в любой момент времени определяются следующим образом

$$\iiint T dx dy dz \quad \text{and} \quad \iiint V dx dy dz,$$

где T и V представляют плотности кинетической и потенциальной энергий в каждой точке пространства, занимаемого системой. Соответственно, выражение действия будет задано формулой

$$A = \iiint\int (T - V) dx dy dz dt \quad \text{or} \quad \iiint\int L dx dy dz dt.$$

Во второй формуле мы просто заменили $(T - V)$ одной буквой L . В дальнейшем $(T - V)$ или L будет называться *функцией действия*.^[123]

Грубо говоря, действие было таким образом по своей природе произведением продолжительности на энергию, содержащуюся в объеме пространства. Ни в коем случае это действие не следует путать с действием, рассматриваемым в законе действия и противодействия Ньютона, который также можно выразить как принцип сохранения

импульса. Еще меньше его можно путать с термином «действие», который встречается в философских трудах. Важность концепции действия проистекает из того факта, что законы механики могут быть выражены в очень сжатой форме, если учитывать концепцию действия. Таким образом, мы получаем так называемый **принцип наименьшего действия**, с которым связаны имена Ферма, Мопертюи и Лагранжа. Более удобная форма этого принципа была дана Гамильтоном; тогда он становится **Принцип стационарного действия Гамильтона**. Если мы ограничимся самым простым случаем, то принцип Гамильтона можно сформулировать следующим образом:

Если мы рассмотрим все разнообразные пути, по которым может двигаться консервативная система, так что она за определенное время перейдет из определенной начальной конфигурации P в определенную конфигурацию Q , то мы обнаружим, что путь, по которому система фактически движется сама по себе, всегда таков, что по нему действие является минимальным (или максимальным).

Теперь принцип действия, как мы уже сказали, вытекает из законов классической механики. Если бы эти законы были другими, принцип действия перестал бы применяться, по крайней мере, в своей классической форме. *Априори* мы не имеем возможности решить, будут ли законы, управляющие физическими явлениями немеханической природы — например, законы электромагнетизма — также вытекать из того же принципа действия.

Но когда Максвелл доказал, что его уравнения электромагнетизма могут быть приведены в форму, совместимую с принципом действия, и когда ему удалось объединить электричество, магнетизм и оптику в одну науку, всеобщая действительность этого принципа была признана. Поскольку этот принцип включает в себя принцип сохранения энергии, мы можем понять, почему принцип действия часто называли высшим принципом физической науки. Кстати, можно упомянуть, что когда принцип действия удовлетворяется каким-либо явлением, теоретически возможно бесконечное количество различных механических интерпретаций этого явления. Однако в случае электродинамических явлений, учитывая сложные гипотезы о взаимодействии (), которые он был вынужден постулировать, Максвелл отказался от всех попыток найти точную механическую интерпретацию, которая соответствовала бы реальности.

До сих пор мы ограничивались утверждением общей действительности принципа действия, применимого ко всем физическим процессам. Теперь остается посмотреть, как этот принцип поможет нам в углублении наших знаний о законах природы. Мы можем понять это следующим образом: как мы видели, принцип налагает условие, что естественная эволюция любой системы должна быть такой, чтобы действие было максимальным или минимальным. Если бы мы могли выразить это условие в терминах обычных физических величин, мы смогли бы заранее составить схему ряда промежуточных состояний, через которые пройдет явление. Из этих знаний мы могли бы вывести выражение законов, управляющих эволюцией явления. Здесь, конечно, возникает двойная проблема. Во-первых, мы должны найти правильное математическое выражение для действия; во-вторых, мы должны быть в состоянии решить чисто математическую задачу определения условий, при которых действие будет максимальным или минимальным.

Все проблемы максимумов и минимумов решаются с помощью *вариационного исчисления*, формы исчисления, которую мы обязаны в основном Лагранжу. Согласно методам этого исчисления, мы устанавливаем, при каких условиях величина является максимальной или минимальной, обнаруживая, при каких условиях она будет *стационарной*.

Объясним, что означает слово «стационарный». Когда камень бросают в воздух, он поднимается с уменьшающейся скоростью, затем, кажется, на мгновение замирает, паря вблизи точки максимальной высоты, прежде чем снова начинает падать обратно к земле. Во время этого короткого периода замирания на вершине своей траектории камень, как говорят, остается «стационарным». Мы можем распознать стационарное состояние, наблюдая, что при его достижении в течение короткого периода времени не происходит заметных изменений. Таким образом, мы можем понять связь, которая существует между стационарным состоянием и наличием максимума или минимума. В математике небольшие изменения обозначаются буквой δ ; следовательно, стационарное состояние действия, или,

$$\delta A = 0 \quad \text{i.e.,} \quad \iiint L dx dy dz dt = 0.$$

опять же, принцип действия, выражается формулой

Вариационное исчисление позволяет нам решать такие чисто математические задачи. В этих условиях задача определения законов, управляющих каким-либо конкретным явлением, сводится к обнаружению выражения функции действия L , относящейся к данному явлению. Лармор применил этот метод к явлениям электричества и магнетизма и показал, как законы электродинамики Максвелла могут быть выведены из подходящего математического выражения L , определяющего электромагнитную функцию действия.

Когда теория относительности вытеснила классическую науку, было признано, что классические уравнения механики являются лишь приблизительными, и возникла необходимость переформулировать принцип действия, чтобы сделать его совместимым с механикой относительности, а значит, и с пространством-временем. Эта работа была проделана чистыми математиками, в частности Клейном и Гильбертом. Тогда было обнаружено, что можно получить принцип действия, лишь незначительно отличающийся от классического. Но поскольку это отличие представляет лишь теоретический интерес, мы будем обсуждать влияние принципа действия на теорию относительности, не принимая во внимание вышеупомянутое незначительное изменение.

В классической науке было странно обнаружить, что действие, хотя и имеющее столь важное физическое значение, тем не менее представляет собой искусственный аспект энергии в пространстве, умноженной на продолжительность. Однако как только мы осознаем, что фундаментальным континуумом Вселенной является пространство-время, а не отдельное пространство и время, причина важности кажущегося искусственным сочетания пространства и времени в выражении для действия получает очень простое объяснение. Отныне действие больше не является энергией в объеме пространства, умноженной на продолжительность; это просто энергия в объеме мира, то есть в объеме четырехмерного пространства-времени. Обозначив объем пространства-времени как $d\omega$, мы получаем

$$d\omega = dx dy dz dt,$$

так что наш принцип действия, $\delta A = 0$, становится

$$\delta \int L d\omega = 0.$$

Теперь между ролями пространства и времени существует совершенная симметрия.

Теперь был еще один аспект принципа действия, который был крайне неприятен классической науке: делая настоящее течение явления зависимым от условия, которое можно было определить только в будущем, он приобретал телеологический характер. Но, как указывает Планк, с действием, задаваемым энергией в объеме пространства-времени, мы можем, поставив пространство и время на одну ступень, рассматривать продолжительность как статическую; и неудовлетворительный телеологический аспект принципа может быть устранен.

Теория пространства-времени предлагает еще больше преимуществ. Она предполагает, что функция действия L должна быть инвариантом *пространства-времени*. Если же мы знаем элементарные физические величины, которые должны входить в этот инвариант, то чисто формальные математические соображения позволяют нам построить все возможные инварианты, и один из них будет представлять функцию действия. Предполагая, что мир состоит из электричества и метрического поля, возможность получения «функции действия» L вселенной кажется вполне достижимой. Если бы этот результат был достигнут, было бы сделано важное открытие, поскольку все законы физического мира были бы включены в выражение

$$\delta \int L d\omega = 0.$$

Применение принципа действия, выраженного в предыдущем выражении, позволило бы нам вывести все законы физической вселенной. Мы бы поняли многое из того, что до сих пор остается загадкой; была бы раскрыта неуловимая причина существования двух типов электричества в природе и объяснена странная тенденция материи и энергии собираться в атомы и кванты. К сожалению, мы далеки от возможности определить «функцию действия» вселенной, поскольку в ее состав могут входить физические элементы, природу которых мы пока не знаем. (Кроме того, можно упомянуть, что сама обоснованность принципа действия ставится под сомнение квантовыми явлениями.) Следующий отрывок, цитируемый из Вейля, дает представление о том, что поставлено на карту:

«В то время как в механике каждой данной механической системе соответствует определенная функция действия L , которая должна быть выведена из состава системы, здесь мы имеем дело с единственной системой — миром. Именно здесь начинается реальная проблема материи: мы должны определить «функцию действия», мировую функцию L , принадлежащую миру. На данный момент это ставит нас в тупик. Если мы выберем произвольную L , то получим «возможный» мир, управляемый этой функцией действия, который будет для нас вполне понятен — даже более, чем реальный мир — при условии, что наш математический анализ не подведет нас. Конечно, тогда мы будем заинтересованы в открытии единственного существующего мира, реального мира для нас. Судя по тому, что мы знаем о физических законах, мы можем ожидать, что L , принадлежащая ему, будет отличаться простыми математическими свойствами. Физика, на этот раз как физика полей, снова преследует цель свести совокупность природных явлений к **единому физическому закону**: когда-то считалось, что эта цель почти достигнута, когда «Начала» Ньютона,

основанные на физике механических точечных масс, праздновали свои триумфы. Но сокровища знания не похожи на спелые плоды, которые можно сорвать с дерева».^[124]

Какова бы ни была конечная судьба таких спекуляций в раскрытии нам тайны материи, нельзя отрицать, что они обладают неоспоримым величием. Во всяком случае, в более ограниченных областях принцип действия привел к важным открытиям.

Гильберт, Кляйн, Вейль, а позднее и сам Эйнштейн, применив принцип действия к метрическому полю пространства-времени, пришли к закону искривления пространства-времени внутри материи и вне материи; то есть к закону гравитации Эйнштейна.

Проблема сводится к выбору подходящего выражения для действия, но в случае закона гравитации возникает особая трудность. Лучше всего понять природу этой трудности можно, рассмотрев более простой случай электромагнитного действия. Электричество и магнетизм проявляются в материальной форме в виде электронов, магнитов и электронов в движении, или токов, а в более эфирной форме — в виде полей, иллюстрируемых электромагнитным полем. Поскольку оба эти проявления электричества и магнетизма должны входить в законы электродинамики, общее электромагнитное действие должно будет включать в себя два соответствующих типа действия. Их легко определить, и применение принципа стационарного действия Гамильтона без дальнейших сложностей дает законы электромагнетизма. Но когда мы рассматриваем материю, классическая наука знала только одну форму, материальную форму; форма поля отсутствовала. Конечно, гравитационные силы, окружающие материю, казались в некоторой степени аналогичными электромагнитным полям, окружающим электроны и магниты. Но, по крайней мере с математической точки зрения, эта аналогия была поверхностной, поскольку, в отличие от электромагнитного поля, гравитационное поле не выражалось дифференциальными уравнениями, указывающими на непрерывное действие через среду. Оно было полем только по названию, и определить его действие казалось невозможным. Открытия Эйнштейна позволили преодолеть эту трудность. Теперь гравитационное поле представлялось полем, аналогичным электромагнитному полю. Это было метрическое поле пространства-времени, определяемое, как мы знаем, распределением потенциала g_{ik} , аналогичным распределению потенциала электромагнитного поля. Его также можно рассматривать как представителя структуры, или геометрии, пространства-времени. Отныне общее материальное или гравитационное действие будет определяться действием самой материи плюс действием метрического поля; недостающее действие было найдено.

Таким образом, решение проблемы гравитации сводится к установлению математического выражения этих двух отдельных действий. Теперь действие материи в области пространства-времени является энергией материи, содержащейся в объеме пространства-времени. Согласно теории Эйнштейна, оно определяется плотностью массы материи, умноженной на объем пространства-времени. Что касается действия гравитационного поля, то, поскольку теперь оно рассматривается как действие метрического поля, его можно обнаружить без особых трудностей. В этой связи мы должны напомнить, что теория относительности предполагает, что действие в объеме пространства-времени должно быть инвариантом; его численное значение, каким бы оно ни было, должно быть независимым от нашего выбора системы координат. Другими словами, действие метрического поля должно быть инвариантом, построенным из фундаментальных тензоров g_{ik} , распределение которых определяет метрическое поле.

При обсуждении тензоров мы упомянули, что существует несколько таких инвариантов, но самый простой из них представлен гауссовой кривизной G . К этому G мы можем добавить любое скалярное или числовое значение λ без изменения его инвариантности,

поскольку числа, конечно же, являются инвариантами. Таким образом, самое простое выражение для функции действия метрического поля получается, если записать его в виде: $G + \lambda$. Именно это выражение и было выбрано Эйнштейном. ^[125]

Отныне выражение стационарного состояния общего действия является просто вопросом математики (вариационного исчисления). В результате мы получаем закон Эйнштейна об искривлении пространства-времени внутри и вне материи, то есть закон гравитации Эйнштейна. В зависимости от того, предполагаем ли мы, что λ равно нулю или имеет ненулевое значение, мы получаем бесконечную вселенную или конечную вселенную де Ситтера или Эйнштейна. В частности, вселенная Эйнштейна будет результатом, если мы наложим условие стабильности на вселенную. Таким образом, мы видим, что принцип действия доказывает, что все три типа вселенной возможны. Если мы хотим решить, какой тип соответствует реальной вселенной, мы должны принять во внимание другие факты, как было объяснено в главе о конечности вселенной.

Теперь остается еще один важный момент, который мы должны упомянуть, прежде чем завершить обсуждение закона гравитации. Мы видели, что принцип действия сам по себе не позволял нам решить, была ли константа λ , присоединенная к действию G метрического поля, равна нулю или имела некоторое ненулевое значение. Другими словами, он не позволял нам решить, была ли вселенная бесконечной или конечной. Но это не единственный источник неопределенности. Мы упомянули, что Эйнштейн выбрал G в качестве функции действия метрического поля, потому что это был самый простой инвариант, состоящий из g_{ik} ; но мы также видели, что можно было построить и другие, более сложные типы инвариантов. Если бы их подставить в выражение действия, мы получили бы альтернативные законы гравитации. Но мы хотим подчеркнуть следующее:

независимо от того, какой именно инвариант мы выберем для представления функции действия метрического поля, все эти инварианты обладают одним общим свойством. Их математическая природа такова, что, когда мы применяем к ним принцип действия, мы обнаруживаем, что кривизна пространства-времени, которая присутствовала бы во внутренней части материи, должна быть такого типа, который оставался бы неизменным. Допуская, что в нашем выборе действия, а следовательно, и закона гравитации, может существовать некоторая неопределенность, все эти законы заставляют нас признать, что в нашей вселенной постоянные сущности, такие как материя, не могут не присутствовать. Конечно, тип сохранения, требуемый принципом действия, не совсем соответствует классической концепции сохранения; но, как мы видели в предыдущей главе, новый принцип становится принципом классического сохранения, когда придерживаются галилеевой системы отсчета.

Наконец, мы можем отметить, что, применив принцип действия к общему действию, образованному гравитационным действием и полевым действием электричества, мы должны получить точный тип искривления пространства-времени, который существовал бы в электромагнитном поле, свободном от электронов и магнитов, например, в пустой области, залитой светом. Тогда обнаруживается (как упоминалось в [главе XXXIII](#)), что электромагнитное поле также производит искривление пространства-времени, менее выраженное, чем то, которое царит внутри материи, но более выраженное, чем то, которое существует в пустом пространстве вокруг материи (то есть в гравитационном поле, обусловленном обычной материей).

ГЛАВА XXXVI

ТАЙНА МАТЕРИИ

Одним из величайших достоинств теории относительности является то, что она позволяет нам представить гравитацию как прямое следствие искривления пространства-времени. Безусловно, величайшим достижением этой великолепной теории было бы то, что она позволила бы нам интерпретировать все проявления физической вселенной с точки зрения различных типов искривления единственного фундаментального континуума — пространства-времени. Но на данном этапе две отдельные причины делают такое решение крайне маловероятным.

Мы помним, что в ходе наших изысканий мы столкнулись с двумя посторонними тензорами: T_{ik} , тензором материи, и E_{ik} , электромагнитным тензором. Кажется невозможным выразить эти тензоры в терминах основных структурных тензоров пространства-времени, а именно g_{ik} . Однако в случае тензора материи T_{ik} ситуация еще не совсем ясна, и мы увидим, что мнения по этому вопросу разделились. Чтобы понять суть

$$G_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}G = T_{ik}.$$

вопроса, обратимся еще раз к гравитационным уравнениям во внутренней части материи:

Существует десять отдельных уравнений, соответствующих десяти отдельным компонентам симметричных тензоров второго порядка G_{ik} и T_{ik} . Если мы предположим, что была выбрана определенная система сетки или, опять же, что наблюдатель определен, то каждая из десяти компонент T_{ik} будет представлять некоторую физическую величину, относящуюся к материи в каждой точке (см. [Приложение II](#)). Например, T_{44} будет представлять плотность массы материи в точке; T_{14} , T_{24} и T_{34} — три компонента импульса материи в точке, измеренные в указанной системе отсчета; T_{11} , T_{22} и T_{33} будут представлять три компонента *vis viva*, или энергии движения, в сочетании с напряжениями в материи в рассматриваемой точке и т. д.

Таким образом, уравнения гравитации означают, что всякий раз, когда мы признаем существование одной из этих физических величин, она всегда сопровождается соответствующими кривизнами пространства-времени. Обычно предполагается, что кривизны создаются теми конкретными вещами, которые мы называем массой, импульсом, энергией, давлением. Таким образом, мы должны признать двойственность природы; существуют как материя, так и пространство-время, или, лучше сказать, материя и метрическое поле пространства-времени. Эйнштейн, разрабатывая свою гипотезу о цилиндрической вселенной, пытался устранить эту двойственность, доказав, что все существование метрического поля, а значит и пространства-времени, можно отнести к присутствию материи. Такая позиция привела к формированию концепции Вселенной, в которой материя превосходит метрическое поле пространства-времени. И, как мы помним, только при соблюдении этой позиции можно было принять веру Маха в относительность всех движений.

Подход Эддингтона прямо противоположен. Он предпочитает исходить из того, что уравнения гравитации не являются уравнениями в обычном смысле, когда одно равняется

другому. По его мнению, они являются тождествами. Они просто говорят нам, как наши чувства распознают существование определенных искривлений пространства-времени, интерпретируя их как материю, движение и так далее. Другими словами, материи не существует; существует только переменная кривизна пространства-времени (). Материя, импульс, *vis viva* — это названия, которые мы даем этим кривизнам из-за различных способов, которыми они воздействуют на наши чувства.

Конечно, позиция Эддингтона, напоминающая позицию Клиффорда, противоречит идеям Римана, поскольку, согласно Риману, протяженность не может иметь геометрии, а значит, и искривления и метрического поля, в отсутствие материи, которая действовала бы как активный формирующий агент. Кроме того, взгляды Эддингтона приводят нас к определенным трудностям, когда мы пытаемся применить принцип действия.

Причина этого проста. Если мы рассматриваем определенную кривизну метрического поля пространства-времени как синоним материи, то нет никаких оснований рассматривать эту кривизну дважды: сначала как представительную для действия материи, а затем как представительную для действия гравитационного поля. Поступая таким образом, мы просто дублируем наши результаты. Следовательно, согласно взглядам Эддингтона, будет только одно действие, действие метрического поля, и мы больше не сможем сложить *два отдельных действия*, чтобы получить *общее действие*. Расчеты показывают, что в областях, где существует материя, принцип стационарного действия нарушается, так что жесткое применение этого принципа означало бы, что мир должен быть лишен материи. Эддингтон не возражает против этой ограниченной действительности принципа действия и защищает свою позицию техническими аргументами, которые мы не можем воспроизвести здесь.

До этого момента нас вело желание обнаружить единство в природе, сводя все вещи к некой фундаментальной форме существования. Однако есть и другой подход к этой проблеме, и на этот раз нашим руководящим принципом будет не только математическая гармония, но и экспериментальные факты.

Мы должны понимать, что тензор T_{ik} , компоненты которого представляют те физические величины, которые воспринимают наши чувства и измеряют наши приборы, в лучшем случае можно считать отражением эффектов, наблюдаемых только макроскопическим способом. Такие явления, как радиоактивные взрывы и все, что мы косвенно узнали из исследования атома, показывают, что в конечном счете материя состоит из вращающихся электронов, вокруг которых присутствуют интенсивные электромагнитные поля. Из этого следует, что микроскопическое исследование материи дало бы картину, сильно отличающуюся от той, которую мы строим на основе наших грубых чувственных восприятий, и что, если бы мы могли рассматривать атом ультрамикроскопическим способом, то предстал бы перед нами как область, подверженная интенсивным электромагнитным воздействиям. Таким образом, кажется, что наш макроскопический тензор T_{ik} должен включать в себя электромагнитный тензор E_{ik} .

Но чтобы устранить двойственность между материей и электричеством, нам нужно доказать, что T_{ik} может быть построен исключительно из более или менее сложного выражения, содержащего E_{ik} , вместе с тензорами, производными от него; тензоры любого другого вида исключаются. С физической точки зрения это означало бы, что атомная материя или связанная энергия, и в частности те формы материи, которые называются электронами и протонами, могут быть построены на основе электромагнитной или свободной энергии. Даже если бы нам удалось это сделать, мы не избавились бы от всей двойственности, поскольку, хотя мы избавились бы от T_{ik} , все равно осталась бы двойственность между E_{ik} и метрическим полем или g_{ik} пространства-времени.

В любом случае, все попытки свести материю к электромагнитным полям до сих пор сталкивались с непреодолимыми трудностями из-за невозможности объяснить такие конечные аспекты материи, как электрон и протон, с помощью одной только теории поля (E_{ik}). Сложность заключается в понимании того, как электрон не взрывается под взаимным отталкиванием своих отрицательно заряженных частей. Кажется, что необходимо какое-то уравнивающее давление, давление Пуанкаре, и, по-видимому, невозможно объяснить это загадочное давление с помощью одной только электромагнитной теории Максвелла. Вслед за Пуанкаре, Мие взялся за решение этой проблемы. Его подход заключался во введении дополнительных величин электромагнитного поля, которые были бы эффективны внутри электрона, но чье действие во внешнем пространстве было бы незначительным. Таким образом, ему удалось построить материю из чисто электромагнитных величин. Эйнштейн комментирует теорию Мие следующими словами:

«Несмотря на красоту формальной структуры этой теории, созданной Ми, Гильбертом и Вейлем, ее физические результаты до сих пор были неудовлетворительными. С одной стороны, многообразие возможностей отталкивает, а с другой — эти дополнительные термины пока не позволяют сформулировать решение в такой простой форме, чтобы оно было удовлетворительным».

После этой попытки Эйнштейн доказал, что можно обойтись без введения дополнительных электромагнитных членов Ми, если предположить, что пространство Вселенной обладает небольшой остаточной кривизной, такой, какая существует в цилиндрической Вселенной. Именно эта остаточная кривизна Вселенной будет действовать как отрицательное давление, предотвращающее взрыв электрона. Если мы заметим, что кривизна Вселенной касается метрического поля, а значит, поля гравитации, то мы увидим, что энергия электрона должна состоять из электромагнитной и гравитационной частей. По словам самого Эйнштейна: «Из энергии, составляющей материю, три четверти следует отнести к электромагнитному полю, а одну четверть — к гравитационному полю».

Эйнштейн считает, что эти факты являются весомым аргументом в пользу конечной вселенной. В любом случае, следует признать, что гипотеза о конечной вселенной навязывается нам по-разному. Не только астрономические соображения, связанные с низкими скоростями звезд, не только математические причины, связанные с граничными условиями, не только философские соображения, связанные с относительностью вращения и относительностью инерции, но и атомные или электронные явления подталкивают нас к одному и тому же решению.

Перейдем теперь к изучению самого электромагнитного тензора. Мы видим, что даже если бы предыдущие попытки увенчались успехом, все равно осталась бы двойственность между гравитацией и материей или электричеством, или, можно сказать, между метрическим полем пространства-времени и тензором E_{ik} . Последний тензор по-прежнему представлялся бы нередуцируемой чужеродной сущностью, присутствующей в пространстве-времени и нарушающей единство природы. Целью теории Вейля было избавить науку от этой двойственности.

Чтобы понять суть проблемы, мы должны отметить, что так же, как фундаментальные структурные тензоры метрического поля B_{ikst} , G_{ik} и G в каждой точке могут быть сведены к очень сложным выражениям между десятью фундаментальными потенциалами g_{ik} в каждой точке, так и теперь электромагнитный тензор E_{ik} может быть сведен к сложному выражению между четырьмя электромагнитными потенциалами, четырьмя ϕ_i (а именно ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 и ϕ_4). Таким образом, объединение, требуемое наукой, заключалось в выражении

потенциалов Эйнштейна-Метрика (g_{ik}) в терминах потенциалов Эйнштейна-Метрика (ϕ_i) или наоборот. К сожалению, между десятью потенциалами Эйнштейна-Метрика (g_{ik}) и четырьмя потенциалами Эйнштейна-Метрика (ϕ_i) не было обнаружено ни малейшего сходства. Потенциалы Эйнштейна-Метрика (ϕ_i) представлялись как чужеродные сущности, встроенные в метри

Все попытки преодолеть эту двойственность были безуспешны, пока мы ограничивали свои спекуляции пространством-временем теории Эйнштейна. Но всегда существовала вероятность того, что пространство-время было менее простым, чем предполагал Эйнштейн. Если бы мы могли представить себе обобщенный тип пространства-времени, обладающий более сложным метрическим полем, то, возможно, удалось бы отождествить фундаментальные « ϕ_i » электромагнетизма с некоторыми особенностями структуры этого обобщенного пространства-времени и его метрического поля. Теория Вейля является попыткой в этом направлении; и хотя она все еще находится на весьма спекулятивной стадии, все указывает на то, что Вейль находится на правильном пути. Сам Эйнштейн принял модифицированную форму теории Вейля в той мере, что внес свой вклад в ее развитие.

ГЛАВА XXXVII

ТЕОРИИ ВЕЙЛЯ И ЭДДИНГТОНА

Общая теория относительности сводится к применению чисто математических открытий Римана к реальному миру пространства-времени, в котором мы живем. Дальнейшее расширение теории стало возможным, когда Вейлю удалось продвинуть геометрическое исследование многообразий дальше той точки, на которой остановились Риман и его последователи. Вейль описывает ситуацию следующими словами:

«Вдохновленный весомыми выводами теории Эйнштейна, чтобы заново изучить математические основы, автор настоящей статьи сделал открытие, что геометрия Римана идет только наполовину к достижению идеала чистой бесконечно малой геометрии. Еще предстоит искоренить последний элемент геометрии «на расстоянии», остаток ее евклидова прошлого».^[126]

Чтобы понять теорию Вейля, которую можно считать обобщением теории Эйнштейна, необходимо изучить природу геометрических вкладов Вейля. Вспомним, что при обсуждении геометрии пространства мы сказали, что геометрия, которую мы приписывали концептуальному пространству, определялась численными результатами измерений, полученными после того, как мы определили тип концептуальных измерительных линеек, которые мы намеревались использовать. Поведение этих измерительных линеек было в значительной степени произвольным, и в зависимости от поведения, которое мы им приписывали, пространство было евклидовым, римановым или лобачевским.

Однако Риман наложил определенные ограничения. Риман предположил, что две единичные стержни, совпадающие в точке A , будут продолжать совпадать при перемещении в другую точку B , независимо от того, следовали ли эти два стержня по одному и тому же пути или по разным путям в пространстве во время их перемещения из A в B . Теперь можно снять это ограничение, наложенное Риманом, не впадая в логическую несообразность; и мы вполне можем предположить, что две единичные линейки, совпадающие в точке A , могут перестать совпадать при сближении в другой точке B , при условии, что они следовали разными путями при перемещении из A в B . С чисто математической точки зрения такое предположение ни в коем случае не является абсурдным; и именно это обобщение возможного поведения наших концептуальных измерительных линеек изучал Вейль. Однако следует иметь в виду, что в данный момент мы не обсуждаем проблему реального пространства; мы не спорим о фактическом поведении наших жестких мерных стержней, как оно определяется практической конгруэнтностью. Мы просто спекулируем, как математики, на логическом расширении геометрии.

Поэтому давайте пересмотрим наши предпосылки. Мы предполагаем, что две единичные линейки, которые совпадают в точке A , перестают совпадать, когда их соединяют в другой точке B , после того как они прошли разные пути перемещения от A до B . Очевидно, что в этом случае утверждение о том, что две длины, расположенные в разных точках A и B пространства, равны по величине, является обязательно неопределенным. Две длины могут оказаться равными, если мы переместим нашу единичную линейку из A в B по определенному пути, и неравными, если мы переместим нашу единичную линейку по какому-либо другому пути. Другими словами, длина непереносима. Учитывая

неопределенность, которая сопутствует сравнению длин в разных местах, мы должны ограничиться сравнением длин в одном месте или в точках, разделенных бесконечно малыми интервалами. Поэтому мы соглашаемся считать, что в каждой точке пространства закреплен стержень, который служит единицей длины при измерении длин, расположенных рядом с ним. Совокупность этих единичных стержней составляет то, что известно как *система мер*. Эти меры могут быть выбраны произвольно; и это не означает, что они обязательно имеют одинаковую длину по отношению друг к другу, поскольку мы видели, что сравнение длин в разных местах является неоднозначным. Их единственная полезность заключается в том, чтобы служить стандартами измерения для длин, расположенных рядом с ними, и таким образом позволять нам сравнивать длины, расположенные в одной и той же точке.

Система мер является естественным продолжением системы сеток, с которой мы уже знакомы. Так же, как мы можем варьировать форму системы сеток, теперь мы можем варьировать природу системы мер.

Попытаемся определить значение этой непереносимости длины в отношении природы самого пространства. В частности, предположим, что две линейки совпадают в точке *A*; тогда, пока одна линейка остается неподвижной в точке *A*, другая описывает замкнутую кривую, возвращаясь в конце концов в исходную точку. Из-за разницы в траекториях, по которым движутся два стержня, один из которых остался неподвижным, а другой описал кривую, после завершения круга, когда мы поместим их рядом, они больше не будут совпадать.

Эта непереносимость длины очень похожа на то, что известно как непереносимость направления, которая имеет место в неевклидовых пространствах, которые мы изучали до сих пор. Рассмотрим, например, кривую поверхность, сферу. Если в точке *A* на сфере два стержня совпадают по направлению, и если один стержень остается неподвижным, а другой перемещается от точки к точке по замкнутой кривой, причем перемещается таким образом, что при каждом последующем бесконечно малом перемещении стержень сохраняет то же направление, было бы ошибочно предполагать, что когда второй стержень вернется в исходную точку, его направление по-прежнему будет совпадать с направлением первого стержня. Было бы обнаружено явное расхождение между направлениями двух стержней, и величина этого расхождения зависела бы от площади, заключенной в замкнутой кривой, по которой второй стержень был вынужден двигаться по поверхности. Это расхождение не имеет ничего общего с нашим выбором системы координат; оно полностью выходит за пределы этого выбора. На сферической поверхности, о которой мы говорим, оно будет варьироваться в зависимости от замкнутой кривой, описанной стержнем; но если бы мы работали на плоском листе бумаги, а не на поверхности, изогнутой как сфера, расхождение вообще бы не возникло. Таким образом, его существование обусловлено кривизной, или неевклидовостью, поверхности, а его величина может служить средством определения точной интенсивности этой неевклидовости вокруг каждой точки поверхности.

Так же как непереносимость направления вызвана кривизной, или неевклидовостью, пространства (которую мы также можем назвать *кривизной направления*) и исчезает с исчезновением этой кривизны, так и аналогичным образом непереносимость длины вызвана новым типом кривизны (называемым *кривизной Вейля* или *кривизной расстояния*) и полностью исчезает, когда этот тип кривизны не существует. В общем случае мы можем назвать пространство *вейлевским*, если оно обладает неисчезающей кривизной расстояния; название «*классические пространства*» будет зарезервировано для всех категорий пространств, которые мы изучали до сих пор (евклидово, риманово, лобачевское,

полуевклидово), поскольку во всех этих пространствах вейлевская или кривизна расстояния отсутствует.

Можно отметить, что так же, как обычный неевклидовость, или кривизна направления, выходила за рамки нашего выбора системы сетки, так и теперь, аналогичным образом, характеристики Вейля — непереносимость длины и, опять же, наличие кривизны расстояния — выходят за рамки нашего выбора системы калибровки.

Теперь мы видели, что евклидовость или неевклидовость многообразия приписывалась метрическому полю, которое оно содержало. Аналогичным образом мы должны предположить, что вейлевские характеристики также должны быть приписаны метрическому полю. Однако метрическое поле, обусловленное g_{ik} , которое обсуждалось до сих пор, неспособно объяснить особенности вейлевского. Необходимо дополнить описание поля, чтобы оно могло учитывать эти новые характеристики. Когда это сделано, обнаруживается, что в четырехмерном континууме, в дополнение к десяти g_{ik} , которые достаточны для описания метрического поля четырехмерного классического континуума, такого как пространство-время, необходимо добавить четыре новые величины, которые мы можем назвать четырьмя k_i . Общее метрическое поле тогда содержит четырнадцать отдельных величин вместо десяти, как в пространстве-времени Эйнштейна. Так же, как направленная кривизна пространства, характеризующая неевклидовость в точке, может быть выражена тензором (тензором Римана-Кристоффеля), построенным из изменений значений между g_{ik} в точке и в соседних точках в любой системе сеток, k_i так и теперь кривизна расстояния в точке может быть задана тензором, построенным из изменений значений между тензорами кривизны в точке и в соседних точках в любой системе калибровок.

В частности, кривизна Вейля f_{ik} в точке задается тензорным уравнением

$$f_{ik} = \frac{\partial k_i}{\partial x_k} - \frac{\partial k_k}{\partial x_i}$$

откуда мы можем получить

$$\frac{\partial f_{kl}}{\partial x_i} + \frac{\partial f_{li}}{\partial x_k} + \frac{\partial f_{ik}}{\partial x_l} = 0.$$

Если пространство не проявляет никаких следов кривизны расстояния, а значит, не имеет вейлевских характеристик, то f_{ik} полностью исчезает, и предыдущие уравнения становятся излишними; в этом случае мы имеем дело с классическим пространством, будь то евклидово, риманово или лобачевское.

Теперь примечательным фактом является то, что эти чисто геометрические соотношения или уравнения, которые открыл Вейль, выражающие значение кривизны Вейля, являются ни чем иным, как уравнениями Максвелла для электромагнитного поля, при условии, что мы отождествляем кривизну Вейля f_{ik} с тензором F_{ik} , компоненты которого представляют электрическую и магнитную силу, и при условии, что мы отождествляем элементы структуры k_i , с электромагнитными потенциалами ϕ_i . Конечно, этот неожиданный параллелизм между уравнениями электромагнетизма и кривизнами пространства Вейля можно было бы списать на простой случай. Но, как следует признать, соблазн взглянуть на вещи иначе был велик. Поэтому Вейль предположил, что

пространство-время было вейлевского типа, а не более ограниченного классического вида, как предполагал Эйнштейн. Тензор электрического и магнитного поля F_{ik} , который в пространстве-времени Эйнштейна казался чужеродным элементом, вторгающимся в континуум, на самом деле был не чем иным, как вейлевской кривизной этого обобщенного пространства-времени. Эти взгляды привели Вейля к предположению, что при наличии электромагнитных полей, то есть когда F_{ik} не исчезает, проявляются вейлевские характеристики пространства-времени, тогда как в областях, свободных от электромагнитных полей, пространство-время восстанавливает свои классические характеристики и вновь становится пространством-временем теории Эйнштейна. По аналогичным причинам четыре электромагнитных потенциала, т. е. четыре ϕ_i , были отождествлены с четырьмя k_i структуры Вейля. Таким образом, электромагнитные явления, в той же степени, что и гравитационные явления, представлялись необходимыми проявлениями метрики фундаментального пространственно-временного континуума.

Рассмотрим дальнейшие изменения, которые повлекут за собой эти новые взгляды. Во-первых, мы помним, что в классических пространствах, а значит, и в пространстве-времени Эйнштейна, было возможно построить фундаментальные или структурные тензоры (B_{ikst} , G_{ik} и G) из десяти g_{ik} . Эти величины, будучи тензорами, конечно же, выходили за рамки нашего выбора системы сетки. Но теперь, когда мы рассматриваем пространство Вейля, мы должны наложить дополнительное требование, чтобы наши величины выходили за пределы выбора как системы сетки, так и системы калибровки. Таким образом, мы получаем величины $*B_{ikst}$, $*G_{ik}$, $*G^2\sqrt{g}$, F_{ik} , которые построены из десяти g_{ik} и четырех k_i (теперь отождествляемых с четырьмя ϕ_i) и которые, кроме того, удовлетворяют всем нашим ранее упомянутым требованиям. Чтобы отличить эти величины от обычных тензоров, которые выходят за пределы нашего выбора системы координат, Эддингтон называет их *ин-тензорами* и *ин-инвариантами* и обозначает их звездочками. В дальнейшем мы будем обращаться к этим ин-тензорам и ин-инвариантам, чтобы выразить те величины, которые (не зависящие ни от системы координат, ни от калибровки) являются неотъемлемой частью самого мира.^[127]

Теперь, предполагая, что пространство-время является вейлевским многообразием, изменение калибровочной системы изменит выражение фундаментальных тензоров теории Эйнштейна (за исключением F_{ik}), а значит, изменит аспект механических законов и законов гравитации. Естественное расширение заставляет нас предположить, что все законы Эйнштейна должны быть обобщены и выражены в терминах интенсоров и инвариантов, чтобы получить уравнения интенсоров вместо уравнений тензоров. Только так мы сможем сделать их независимыми от изменения системы калибровок, так же как их первоначальная тензорная форма уже сделала их независимыми от изменения системы сеток. Это изменение в форме законов Эйнштейна повлияет только на механические и гравитационные законы, поскольку электромагнитные законы, определяющие кривизну Вейля, уже являются уравнениями ин-тензоров.

Однако мы можем предположить, что тензорные законы Эйнштейна в той форме, в которой они были даны Эйнштейном, согласуются с какой-то конкретной системой калибровок; и это Вейль называет *естественной калибровкой*. Мы должны представлять себе эту систему естественной калибровки как навязанную нам природой и определяемую определенными внутренними свойствами Вселенной. Но единственной определенной величиной, которую нам предлагает природа в каждой точке, является радиус кривизны Вселенной в каждой точке. Следовательно, Вейль определил естественную калибровку в каждой точке как единицу длины, равную радиусу кривизны Вселенной в этой точке или некоторой определенной его части. Если эти идеи верны, то Вселенная не может не

обладать кривизной в каждой точке и, следовательно, должна быть конечной, поскольку, если бы она была бесконечной, не было бы естественной калибровки, с помощью которой можно было бы измерять расстояния.

Теория Вейля, изложенная до сих пор, представляет собой теорию в ее первоначальном виде; но мы увидим, что Вейль был вынужден в некоторых отношениях изменить свои первоначальные взгляды. Дело в том, что эмпирические результаты, по-видимому, противоречат его теории в ее первоначальном виде. Теория заставляет нас предположить, что в областях, где присутствуют электромагнитные поля, то есть в областях, где пространство-время является вейлевским, перенос длины является неопределенным процессом. Конечно, когда мы говорим о длине в пространстве-времени, мы в первую очередь имеем в виду пространственно-временное расстояние, то есть интервал Эйнштейна. Но интервал Эйнштейна, как мы помним, может быть разбит на пространственное расстояние, на продолжительность или на то и другое, в зависимости от случая. Этот результат достигается, когда наблюдатель соотносит интервал Эйнштейна со своей системой координат пространства и времени. Из этого следует, что в пространстве-времени Вейля не только перенос длины эйнштейновского интервала даст неопределенные результаты, но то же самое автоматически применимо к переносу пространственных, а также временных величин. Таким образом, два идентичных электрона, расположенных сначала в любой одной точке, а затем разделенных, в общем случае будут различаться по размеру и заряду, когда их снова соединят. Точно так же та же неопределенность будет применима к продолжительности. Следовательно, вполне уместно было бы предположить, что два идентичных атома, расположенных в одной точке и колеблющихся с одинаковой частотой, будут иметь разные частоты колебаний после того, как они будут разделены и снова соединены. Это будет похоже на то, как если бы размер атома и его частота колебаний зависели от его предыдущей истории жизни. Кстати, эти явления лишили бы эффект сдвига Эйнштейна всякой ценности, поскольку любое замедление скорости колебаний солнечного атома можно было бы объяснить различием в предыдущей истории жизни солнечных и земных атомов, а не обязательно влиянием гравитационного поля Солнца.

Теперь все эти предсказания теории Вейля в ее первоначальной форме противоречат точным наблюдениям. Насколько это можно определить экспериментально, заряды и размеры всех электронов абсолютно одинаковы, независимо от их прошлой истории; это также относится к частотам колебаний атомов одного и того же химического элемента.^[128] Таким образом, представляется, что если пространство-время является пространством Вейля, то характеристики Вейля по той или иной причине полностью стираются, так что, в конечном счете, пространство-время, хотя и является вейлевским, проявляет только свойства более ограниченного риманова типа пространства.

Таким образом, Вейль был вынужден провести различие между *адаптацией* и *постоянством* и предположить, что тела автоматически адаптируются к естественной калибровке, то есть к радиусу Вселенной. Если бы тела следовали тенденции постоянства, то наблюдались бы вейлевские расхождения; но поскольку тела адаптируются заново от места к месту и от момента к моменту к форме Вселенной, а частоты колебаний атомов действуют аналогичным образом, эти расхождения автоматически устраняются. Можно отметить сходство между этими взглядами и взглядами Эддингтона в теории Эйнштейна (см. главу о конечности Вселенной).

Эти взгляды также позволяют нам лучше понять значение естественной калибровки. Поскольку объекты в равновесии, такие как твердые тела, электроны и атомы, все приспособляются к радиусу кривизны Вселенной, вполне естественно, что наиболее

простые результаты будут получены, если мы выберем этот радиус или некоторую его часть в качестве калибровки в каждой точке.

Теперь, с наложенными нами ограничениями, может показаться, что от теории Вейля ничего не осталось, поскольку мы лишили вейлевское пространство-время всех его характеристик, применив тенденцию приспособления вместо тенденции постоянства. Однако такая точка зрения была бы слишком крайней. Действительно, отождествление Вейлем электромагнитных потенциалов (), то есть потенциалов, связанных с индукцией (ϕ_i), с особенностями структуры континуума (k_i) теперь выглядит скорее как графическое представление, но как таковое оно остается полезным. Действительно, мы должны помнить, что первоначальным стимулом, который сделал такую теорию, как теория Вейля, желанной, была необходимость достичь более единого понимания природы, включив в структуру фундаментального континуума пространства-времени по крайней мере представление электрических проявлений, вместо того чтобы рассматривать их как посторонние явления. С этой точки зрения теория Вейля кажется надежной.

Но именно когда мы приступаем к рассмотрению проблемы *действия* вселенной, теория Вейля открывает наиболее интересные возможности. Мы помним, что действие, так сказать, составляло бы ядро, из которого происходили бы все законы природы. Фактически, если бы действие было известно, все, что нам нужно было бы сделать, это выразить его стационарное состояние, и законы материи и электричества были бы раскрыты. Но проблема в том, что мы не знаем, каким может быть действие; мы можем только догадываться о нем. В этом отношении теория Вейля оказывается полезной. Поскольку теория Эйнштейна ограничивает действие инвариантностью пространства-времени, теория Вейля позволяет нам сузить выбор, налагая более строгие условия инвариантности. В результате гауссова кривизна G или $G\sqrt{g}$, которую Эйнштейн считал функцией действия гравитационного поля, должна быть отвергнута и заменена инвариантом $*G^2\sqrt{g}$.^[129] Таким образом, мы приходим к закону гравитации с членом λ , то есть к конечной вселенной.

Кроме того, идеал единства, к которому неустанно стремится наука, требует, чтобы действие строилось на структурных элементах фундаментального континуума. В теории Эйнштейна это было невозможно, поскольку электромагнитные потенциалы (*т. е.* ϕ_i) были чужды структуре пространства-времени. Отсюда следовало, что мы имели дело с двумя отдельными действиями: гравитационным и электромагнитным. Теория Вейля позволяет нам объединить эти действия, поскольку электромагнитные потенциалы, ϕ_i , теперь представлены k_i в обобщенной структуре пространства-времени. Соответственно, Вейль построил инвариант, который он предварительно предложил в качестве функции действия мира. В дополнение к гравитационным и электромагнитным уравнениям, которые были выведены из него, стационарное состояние действия (см. главу XXXV) повлекло за собой определенные электромагнитные уравнения, имеющие отношение к строению материи. В свете этих уравнений и принимая во внимание тот факт, что материя всегда имеет положительную плотность, Эддингтон приходит к следующему выводу: «Из этого, по-видимому, следует, что электрон не может быть построен из элементарных электростатических зарядов, но разлагается на нечто, более схожее с магнитными зарядами».

На этом этапе Эддингтон дал дальнейшее изящное обобщение геометрии Вейля. g_{ik} Здесь давайте вспомним, что в то время как в теории Эйнштейна фундаментальных элементов структуры пространства-времени было десять (десять), а в теории Вейля их было четырнадцать (десять g_{ik} и четыре k_i), в еще более общей многомерности Эддингтона мы сталкиваемся с 40 величинами (сорока Γ_{kt}^i). Дело не в том, что Эддингтон ввел новые

элементы структуры в многообразии. Далеко не в том: эти элементы присутствовали во всех типах многообразий, которые мы обсуждали. Но они были кристаллизованы ограничениями, которые выводили их из-под контроля математика; и то, что сделал Эддингтон, — это ослабил их. Например, исходя из обобщенного многообразия Эддингтона, если мы наложим определенные ограничения на сорок Γ_{kt}^i , то получим многообразие Вейля; наложив еще другие ограничения, мы получим классические многообразия, частным случаем которых было пространство-время Эйнштейна. Фактически, даже в многообразии Эддингтона на Γ_{kt}^i по-прежнему накладываются определенные ограничения симметрии, определяющие так называемое *аффинное* условие; если бы не эти ограничения, то было бы 64 таких Γ_{kt}^i . Насколько известно автору, полученные в результате высокообобщенные многообразия не изучались, но интересно отметить, что их можно представить, и никто не может предсказать, не окажется ли их введение в конечном итоге необходимым. Поскольку геометрия Эддингтона является обобщением геометрии Вейля, мы можем ожидать в ней некоторых новых особенностей. Так, в геометрии Вейля мы видели, что длина стержня будет изменяться, если его переместить из одной точки в другую. С обобщением Эддингтона мы должны предположить, что изменение длины также произойдет, если стержень будет вращаться вокруг одной из своих точек, то есть если его ориентация будет изменена, даже если стержень в целом не будет перемещен.

И здесь можно сказать несколько слов о цели этих последовательных обобщений. Конечная цель — это объединение. Мы хотим добиться успеха в представлении всей физической вселенной с точки зрения взаимосвязей структуры фундаментального пространственно-временного континуума. Пространство-время Эйнштейна позволило нам объяснить гравитацию таким образом, но электромагнитное поле появилось как чужеродное вторжение. Ни один из известных элементов структуры не казался способным объяснить его. Казалось, что мир пространства-времени, гравитирующих масс и энергии мог бы существовать и без этого электрического вторжения. Теперь у нас есть все основания полагать, что это не может быть так, поскольку материя состоит из протонов и электронов, уничтожение электричества повлекло бы за собой уничтожение материи, гравитации и энергии, а возможно, и пространства и времени. Чтобы преодолеть эту трудность, показалось необходимым обобщить наше представление о пространстве-времени, получив тем самым континуум, представляющий дополнительные элементы структуры, которые можно было бы отождествить с электрическими и магнитными силами. Итак, мы пришли к обобщению Вейля, которое позволяет электромагнитному полю войти в общую синтезу не как постороннее дополнение, а как составной элемент структуры пространства-времени. Но, помимо поля, есть еще и электрон, и одно только поле, по-видимому, не дает нам возможности построить электрон; мы не можем объяснить атомарность или кванты действия. В этом заключается проблема материи, которая и сегодня остается нерешенной задачей для науки. Мы также не можем понять значение двух различных видов электричества: положительного и отрицательного. До тех пор, пока все эти загадки остаются неразрешенными, вполне естественно, что мы должны искать новые элементы структуры, продолжая дальнейшие обобщения. Теория Эддингтона была разработана с этой целью.

Существуют некоторые интересные особенности теории Эддингтона, о которых мы можем кратко упомянуть. Поскольку внутренние величины Вселенной должны быть интенсиорами и инвариантами, а не тензорами и инвариантами, тензоры Эддингтона (g_{ik}) теряют свое превосходство; поскольку тензоры Эддингтона (g_{ik}), хотя и выходят за пределы нашей системы сеток, не выходят за пределы нашего выбора системы калибровок. Соответственно, при выражении расстояния мы должны заменить g_{ik} каким-либо ин-

тензором аналогичной природы. Единственным фундаментальным структурным ин-тензором, который представляет собой, является ${}^*G_{ik}$ или некоторая определенная его часть, такая как $\frac{{}^*G_{ik}}{\lambda}$, где λ — произвольная константа. Следовательно, мы должны поставить

$$ds^2 = \frac{1}{\lambda} \sum {}^*G_{ik} dx_i dx_k$$

вместо

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k.$$

Идентификация нового выражения с выражением, использованным Эйнштейном, приводит к тензорному уравнению ${}^*G_{ik} = \lambda g_{ik}$, которое при отсутствии электромагнитных полей сводится к $G_{ik} = \lambda g_{ik}$. Это уравнение конечной вселенной, поэтому мы видим, что конечность вселенной, по-видимому, является необходимым следствием теории.

Стоит также отметить еще один момент. Гравитация, которая включает в себя g_{ik} , задается симметричным тензором; электричество, с другой стороны, задается антисимметричным тензором F_{ik} . Теперь, в теориях как Вейля, так и Эддингтона, тензор ${}^*G_{ik}$ заменяет тензор Эйнштейна G_{ik} . Но в то время как G_{ik} является симметричным, ${}^*G_{ik}$ разделяется на симметричную и антисимметричную части; эти две части задаются g_{ik} и F_{ik} . Другими словами, тензор мира сам по себе разделяется на гравитацию и электричество, демонстрируя тем самым глубокую связь между ними.

Еще в 1922 году Эйнштейн не проявлял особого энтузиазма по поводу этих новых обобщений, но впоследствии, по-видимому, изменил свои взгляды и даже стал исследовать проблему мирового действия в свете геометрии Эддингтона.

Сначала он изучил возможное математическое выражение действия, которое уже было предложено Эддингтоном. Это было поразительно простое выражение, представляющее некоторые обобщенные искривления пространства-времени; это уже не было простой комбинацией различных действий. Когда к нему был применен принцип стационарного действия, оно развалилось, давая с одной стороны закон гравитации, а с другой — законы электричества. Математические результаты, полученные Альбертом Эйнштейном () в этом отношении, указывают на общее распространение электричества по всему миру; и, как и в случае с подходом Вейля (Weyl), в основе материи, по-видимому, лежат магнитные, а не электрические заряды. Впоследствии Эйнштейн доказал, что другие выражения действия дадут те же результаты.

Однако, несмотря на все эти замечательные успехи, перспективы не слишком обнадеживающие. Проблема материи не ближе к решению, чем раньше. Более того, весьма вероятно, что придется рассматривать какой-то совершенно новый подход. Здесь следует отметить, что описанные нами попытки следуют методам физики поля, то есть предполагают, что вся физическая вселенная построена из g_{ik} и ϕ_i или других величин того же рода. Однако ряд фактов и явлений ставит под сомнение успех такого подхода.

Во-первых, в случае электрона отношение его заряда к массе составляет порядка 10^{20} .^[130] Отсюда следует, что электростатическое отталкивание, которое два удаленных электрона оказывают друг на друга, в 10^{40} раз превышает их взаимное гравитационное притяжение.

Теперь существование столь высокого числа, составляющего одну из характеристик электрона, кажется, исключает возможность вывода о существовании электрона из уравнений поля. Похоже, что действует какое-то другое контролирующее влияние. Возможно, нам придется искать это влияние в общем числе электронов, существующих во Вселенной, числе, которое, по-видимому, определяется случайностью.

Физика поля вместе с принципом действия сталкивается с дальнейшими трудностями, когда мы рассматриваем квантовые явления и существование атома Бора. Поэтому в ряде случаев за самим полем, по-видимому, скрывается нечто более глубокое. Если это так, то мы должны ограничить роль поля чисто пассивной частью, ролью передачи эффектов, а не их порождения. Однако если мы откажемся от всех попыток интерпретировать материю с точки зрения величин поля, это не означает, что мы должны вернуться к отвергнутой идее субстанции. В нынешнем состоянии наших знаний все эти проблемы настолько запутаны, что кажется бесполезным делать какие-либо определенные выводы по поводу них. Все, что мы можем сказать, это то, что мы сталкиваемся с чем-то, чего не понимаем. Вейль выражает эти идеи следующими словами:

«Если взгляды Мие верны, мы могли бы признать поле объективной реальностью, и физика больше не была бы далека от цели дать настолько полное представление о природе физического мира, материи и природных сил, что логическая необходимость извлекла бы из этого понимания уникальные законы, лежащие в основе происхождения физических явлений. Однако на данный момент мы должны отвергнуть эти смелые надежды. Законы метрического поля имеют отношение не столько к самой реальности, сколько к тенеобразной протяженной среде, которая служит связующим звеном между материальными вещами, и к формальному устройству этой среды, которое дает ей способность передавать воздействия». И в другом месте: «Здесь мы должны недвусмысленно заявить, что физика на современном этапе ни в коем случае не может рассматриваться как подтверждение веры в существование причинно-следственной связи физической природы, основанной на строго точных законах».

В целом, мы должны понимать, что чем дальше мы продвигаемся, тем более неразрешимыми становятся наши трудности. Существование материи по-прежнему остается загадкой.

ЧАСТЬ IV

МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ

ГЛАВА XXXVIII

МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ

Философы обычно считают, что задача физиков состоит в том, чтобы взвешивать, измерять, составлять таблицы, открывать новые химические элементы, новые факты, а задача математиков — решать уравнения. Пока ученый ограничивается исследованиями такого рода, он действует в строго научных рамках, и его усилия следует поощрять, но когда он начинает обсуждать последствия своих открытий и делать выводы по поводу пространства, времени, энергии, законов природы, он выходит за пределы своей компетенции и вторгается в область метафизики.

Бергсон очень четко выражает эту точку зрения в своей книге «Продолжительность и одновременность». Он сообщает нам, что причина, по которой математики были настолько обмануты значением теории относительности, что захотели заменить пространство и время пространством-временем, заключается в их недостатке философского прозрения. Они ошибаются, желая придать метафизическое значение концепции, которая (по Бергсону) представляет собой всего лишь математическую фикцию.

На эти и подобные обвинения ученые (если они вообще отвечают) отвечают словами Кельвина: «Математика — единственная истинная метафизика». Клиффорд в своих популярных эссе с особым упором выражает научную точку зрения, когда пишет: «Название философ, которое первоначально означало «любитель мудрости», каким-то странным образом стало означать человека, который считает своим делом объяснять все в определенном количестве больших книг. Я думаю, что пропорционально его колоссальному невежеству будет совершенство и симметрия системы, которую он создает, потому что гораздо легче привести в порядок пустую комнату, чем заполненную». Эти мнения доказывают, что между учеными и философами существует определенное недопонимание, которое можно было бы легко избежать, если бы философы должным образом осознавали свои неизбежные ограничения при обсуждении научных вопросов. Самый простой способ подойти к источнику проблемы, по-видимому, заключается в том, чтобы проанализировать методы ученых и выяснить, в чем они отличаются от методов философов.

Развитие всех отраслей физической науки происходило примерно по одной и той же схеме. Сначала мы наблюдаем накопление экспериментальных и наблюдательных фактов, полученных в результате грубых наблюдений и открытий лабораторных работников. Затем, благодаря усилиям теоретических исследователей, этот сырой материал координируется в единое целое. Таким образом, из разрозненной серии фактов рождается связанная доктрина или наука. История доказывает, что за очень редким исключением (иллюстрируемым такими людьми, как Ньютон, Архимед, а также Герц), самые блестящие экспериментаторы обладали лишь небольшими теоретическими способностями; и что, наоборот, самые способные теоретические ученые были плохими лабораторными работниками. Таким образом, мы приходим к выводу о необходимости различать два типа ученых: практиков и теоретиков. Например, в физике Максвелл, Планк и Эйнштейн должны быть отнесены к теоретическим исследователям, тогда как Герц и Майкельсон являются прекрасными примерами способных экспериментаторов.

В современной науке, по крайней мере в физике, эти работы по координации могут быть предприняты только с помощью передового математического анализа; следовательно, теоретические физики должны обязательно обладать глубокими знаниями в области

математики. Однако, строго говоря, они не являются великими математиками. Математика для теоретических физиков является лишь инструментом, средством для достижения координации физических фактов. Эти люди никогда не занимались изучением математики как искусства само по себе; они никогда не создавали новых математических инструментов, никогда не делали математических открытий. Таким образом, их нельзя причислять к математикам такого калибра, как Лагранж, Гаусс, Риман или Пуанкаре, которым современная математика обязана своим существованием. Так же как мы были вынуждены провести различие между экспериментаторами и теоретическими физиками, так и в данном случае мы должны провести различие между теоретическими физиками и чистыми математиками. Опять же, за очень редким исключением, олицетворяемым Фурье, Пуассоном, Пуанкаре, Минковским и Вейлем, чистые математики редко вносили прямой вклад в развитие теоретической физики, хотя, конечно, их открытия косвенно использовались физиками. Поскольку они не являются ни великими математиками, ни способными экспериментаторами, как же нам называть таких людей, как Максвелл, Лоренц и Эйнштейн?

Если мы согласимся, что название «философ» следует применять к тем, кто больше занимается гармонизацией целого, чем поиском отдельных фактов, или, опять же, общим взглядом на вещи, а не ограниченным, то мы должны согласиться, что теоретических физиков следует называть философами. Таким образом, они являются философами неорганического мира, так же как чистых математиков можно назвать философами абстрактных отношений.

Теперь, как мы уже сказали, факты, которые эти научные философы стремятся скоординировать, имеют ограниченный характер; они носят математический, физический и химический характер; отсюда ясно, что есть место для более общего типа философа — своего рода сверхфилософа, — факты которого охватывали бы все сферы человеческого знания, включая сознание, эмоции и отношения между разумом и материей. Традиционные философы — или, поскольку мы обсуждаем научные вопросы, философы-любители? — стремятся попасть в эту категорию мыслителей.

Похоже, что теоретические ученые и непрофессиональные философы имеют много общего; они различаются только по объему фактов, которые они стремятся скоординировать. Но здесь возникает первое нарушение. Теоретический ученый действует с максимальной осторожностью и считает себя вправе выдвигать теории только после того, как достаточное количество фактов было установлено экспериментально и наблюдательно; до тех пор он хранит молчание. Эта осторожная позиция проявляется даже в самых революционных теориях, таких как теория относительности и квантовая теория. Не один, не два и даже не три отрицательных эксперимента в области электромагнетизма подтолкнули Эйнштейна к его революционной теории; это был весь комплекс электродинамики. Даже в этом случае он сформулировал свое решение только после того, как ряд более классических попыток решить те же проблемы потерпел неудачу.

Но когда мы рассматриваем подход философа-дилетанта, обсуждающего научные вопросы, мы видим, что его подход совершенно иной. Взяв случайные примеры, мы обнаруживаем, что современный философ говорит нам, что пространственно-временная система должна рассматриваться как ограниченная, поскольку «все существующие вещи, в отличие от чистых форм или порядков, являются конечными».^[131] Но средний ученый ответил бы, что с той же степенью правдоподобия мы могли бы сказать, что пространственно-временная система должна быть бесконечной, поскольку понятие бесконечности существует. В любом случае, поучительно сравнить эти неточные аргументы с кропотливой работой Эйнштейна, которая привела его к идее конечной вселенной.

Другой пример — комментарии Бергсона о неизменной скорости света. Он объясняет, что, поскольку корпускулярная теория света была отвергнута, свет является распространением, а не переносом материи. Поэтому (по мнению Бергсона) вполне естественно, что его скорость должна быть неизменной. По его собственным словам: «Почему она должна зависеть от определенного, слишком человеческого способа восприятия и понимания вещей?» Бергсон, по-видимому, забывает, что только свет в вакууме движется с неизменной скоростью, и даже в этом случае только в условиях отсутствия материи (). Луч света, проходящий через воду, также является распространением, и все же его скорость не является неизменной, как доказал эксперимент Физо семьдесят лет назад. Кроме того, мы с равной правдоподобностью могли бы применить аргументы Бергсона к звуковым волнам. Они также являются распространением, и, тем не менее, их скорость опять же не является постоянной. Короче говоря, похоже, что философ, даже когда он правильно интерпретирует факты, не знает о таком большом количестве других фактов, что его философские выводы не имеют под собой прочного основания.

Это что касается фактов, но факты — это еще не все, поскольку главная цель теоретического ученого — скоординировать эти факты. Но и здесь критика философа предполагает, что, будучи неспособным следовать за серией математических выводов, которые приводят теоретического ученого к его выводам, он не понимает необходимости этих выводов и, соответственно, считает их дикими догадками, над которыми он неизменно предлагает свои собственные в качестве улучшения.

Возможно, несколько конкретных примеров помогут более ясно выделить некоторые моменты, которые мы пытаемся подчеркнуть. Вернемся, например, к пространству-времени, которое так не нравится Бергсону. Его позиция, как уже было сказано, заключается в том, что пространство-время — это чистая математическая фикция, которая никоим образом не требуется теорией относительности, которую он признает физически обоснованной, при условии, что ее интерпретация будет оставлена на откуп философам-дилетантам. Его аргументы выглядят примерно так: вы, физики, провели определенные электромагнитные эксперименты; вы, математики, на их основе вывели преобразования Лоренца-Эйнштейна на чисто формальных основаниях. Затем вы соединили эти преобразования и обнаружили определенный математический инвариант. До сих пор все хорошо; теперь вы должны остановиться. Интерпретировать эти результаты — дело нас, философов. Мы начнем с того, что исключим ваши ошибочные выводы о существовании четырехмерного континуума, пространства-времени, в котором пространство и время являются лишь абстракциями. Внимательно следите за нашими аргументами, и мы вас убедим. Возможно, вы, математики, не заметили, что каждый наблюдатель прекрасно осознает отдельное пространство и время, куда бы он ни пошел, так же как он осознает отдельное пространство и температуру. Если бы пространство-время было единственным континуумом, как вы утверждаете, мы никогда не могли бы осознавать пространство и время, а только пространство-время. Это противоречит фактам. Следовательно, пространство-время — это мистификация, и ваша математика ввела вас в заблуждение. — Q. E. D.

Но очевидно, что аргументы такого рода никогда не могут иметь никакой ценности, поскольку они основаны на полном неправильном понимании значения размерности и многообразий. Это высокотехнические концепции, для понимания которых требуется больше, чем грубые элементарные знания математики. Однако даже не вдаваясь в подробности, мы можем легко убедиться в ошибочности аргумента Бергсона, применив его к трехмерному пространству классической науки. Так, мы знаем, что где бы мы ни

находились в трехмерном пространстве, мы всегда можем разделить его на высоту, длину и ширину; однако это не исключает того факта, что длина, ширина и высота являются лишь абстракциями от одной единственной сущности, а именно трехмерного пространства. И точно так же, как было продемонстрировано Минковским, длина, ширина, высота и продолжительность являются лишь абстракциями от четырехмерного пространства-времени.

Другой философ, профессор Брод, в своей книге «Научное мышление» сообщает нам: «(a) Независимо от того, какую систему отсчета мы выберем, нам понадобятся четыре независимых элемента информации, чтобы определить место и время любого мгновенного события. Этот факт выражается утверждением, что природа является четырехмерным многообразием, и ничего больше этим не выражается. (b) В любой выбранной нами системе координат мы обнаружим, что наши четыре элемента информации делятся на две группы: три из них являются пространственными, а один — временным. Таким образом, мы должны быть осторожны и не говорить и не слушать бессмысленные утверждения о том, что «время является четвертым измерением пространства».

Сейчас принято считать, что тот, кто говорит о времени как о четвертом измерении пространства, выражается очень неточно. Правильнее было бы сказать: «Время — это четвертое измерение пространственно-временного мира». Но из аргументации Бродта не следует, что его беспокоит именно неточность формулировки. Его слова подразумевают, что именно упоминание о времени *как о четвертом измерении* следует считать «нонсенсом». Таким образом, его ошибка в этом отношении точно такая же, как и у Бергсона. Что касается его утверждения, что четырехмерная структура, которую относительность Минковского () приписывает природе, означает не более того, что событиям требуются четыре координаты для их размещения и датировки, то это утверждение едва ли верно. Если бы эта тривиальная информация была всем, что Минковский имел в виду, когда он называл мир четырехмерным, его открытие не вызвало бы ни восхищения, ни критики. Оно прошло бы незамеченным учеными, как выражение банальной истины, которая не была бы новостью даже для ребенка. То, что философы так упорно не могут понять, — это разница между *аморфным континуумом*, таким как многообразие звуков или цветов, и *метрическим континуумом*, то есть континуумом, с которым связана определенная геометрия. Минковский доказал, что, вопреки убеждениям классической науки, мир является четырехмерным «метрическим» континуумом, то есть таким, с которым связана четырехмерная геометрия пространства и времени. Именно этот новый аспект мира подразумевал революционную концепцию слияния пространства и времени. И именно этот аспект дал Минковскому право говорить о времени как о четвертом измерении в глубоком смысле, а не в тривиальном, который, хотя и не оспаривался классической наукой, никогда не подчеркивался из-за его искусственного характера. Действительно, если бы не эта интерпретация, данная его словам самим Минковским и всеми учеными, четырехмерный мир казался бы столь же искусственным, как четырехмерное пространственно-температурное континуум. Конечно, различные значения, которые математики придают слову «измерение», могут вызвать некоторые затруднения у начинающих, но, с другой стороны, если не понять четырехмерный аспект природы в релятивистском смысле, то совершенно бесполезно философствовать о более сложных аспектах теории. Прежде чем пытаться бежать, мы должны хотя бы научиться стоять на ногах.

Возьмем другой случайный пример: то же самое происходит, когда профессор Брод обсуждает закон гравитации. Несмотря на свое осуждение концепции пространства-времени как единого четырехмерного континуума, он не видит никакой несообразности в обсуждении геометрии этого четырехмерного континуума. В любом случае, после того как

он сообщает читателю, что пространство может быть плоским или искривленным, как яйцо или сфера, он решает (с. 224), что закон $G_{ik} = 0$ обозначает *сферическую* кривизну. Затем, на более поздней странице (с. 485), нам сообщают, что кривизна является *гомалоидальной*. Это затрудняет воображение читателя, поскольку «гомалоидальный» означает плоский, а пространство не может быть одновременно гомалоидальным и сферическим. Однако следует предположить, что Брод имел в виду «однородный», а не «гомалоидальный», и мы будем взаимозаменяемо использовать эти два слова. Но даже с такой поправкой его предпосылки являются полностью неверными, поскольку закон $G_{ik} = 0$, который должен объяснять гравитацию, не является ни сферическим, ни однородным, ни гомалоидальным. Этот закон представляет собой гетерогенный вид кривизны; более того, если бы кривизна была сферической, она никогда не могла бы объяснить гравитацию.

Исходя из своих ошибочных предпосылок, наш философ вскоре попадает в еще большее замешательство. После того как он говорит нам (с. 224), что якобы сферический закон кривизны $G_{ik} = 0$, способен объяснить гравитацию и все гравитационные эффекты, предсказанные Эйнштейном, он затем сообщает нам (с. 485), что этот закон не может быть законом гравитации в реальном мире, потому что пространство вокруг Солнца никогда не бывает полностью пустым, а заполнено разреженной космической материей, электромагнитными полями и световыми волнами. Это случайное присутствие материи и электромагнитных полей (всегда, согласно Броду) изменяло бы закон сферической кривизны $G_{ik} = 0$, делая его неоднородным. Но все эти утверждения совершенно ошибочны, поскольку, как мы уже сказали, даже в идеально пустом пространстве-времени закон кривизны $G_{ik} = 0$, вокруг Солнца все равно оставался бы неоднородным, не говоря уже о незначительных дополнительных эффектах, которые могли бы быть вызваны случайным распределением материи. Другими словами, неоднородность является существенной, а не случайной.

Теперь мы подошли к философским выводам профессора. Он отмечает, что этот переход от пространства-времени, которое является сферическим и однородным в гравитационном поле, к пространству-времени, которое является неоднородным, вызван случайным присутствием материи вокруг Солнца. Эйнштейн никогда не подчеркивает этот момент, который выявил Брод, откуда Брод делает вывод, что этот важный переход от однородности к неоднородности был «замазан». Как философ, он осуждает такое небрежное отношение, указывая, что речь идет о совершенно новой концепции пространства, которая должна быть подвергнута тщательному философскому анализу.

Конечно, это обвинение совершенно необоснованно и вытекает исключительно из неправильного понимания фактов нашим философом. Неоднородность никогда не вводилась так небрежно, как полагает Брод. Она была введена с самого начала, в тот момент, когда Эйнштейн написал свои гравитационные уравнения $G_{ik} = 0$, что любой, кто знаком с теорией пространств, сразу бы понял. Эта гетерогенность пространства-времени не только не была замалчивана, но и составляет саму суть общей теории Эйнштейна. В то время как в классической науке солнце создавало вокруг себя поле силы в идеально плоском пространстве, в общей теории относительности солнце создает *гетерогенную* кривизну пространства-времени. Поле силы является лишь проявлением этой кривизны. Что касается новой концепции, которую эта неоднородность навязывает нашему пониманию мира, то она подверглась критическому анализу со стороны Вейля и Эйнштейна. Кроме того, эта концепция не так нова, как полагает Брод, поскольку мы обязаны ею Риману, который семьдесят лет назад сделал эпохальные открытия в области неевклидовой геометрии. Как говорит Вейль:

«Риман отвергает мнение, которое преобладало до его времени, а именно, что метрическая структура пространства является фиксированной и по своей сути независимой от физических явлений, для которых она служит фоном, и что реальное содержание завладевает ею, как жилыми квартирами. *Напротив, он утверждает, что пространство само по себе не является ничем иным, как трехмерным многообразием, лишенным всякой формы; оно приобретает определенную форму только с появлением материального содержания, которое наполняет его и определяет его метрические отношения*». И снова, в другом месте:

«Именно на этой идее, которую в свое время Риман не смог реализовать, Эйнштейн в наше время, независимо от Римана, воздвиг внушительное здание своей общей теории относительности». (Можно отметить, что Эйнштейн смог реализовать идеи Римана, потому что применил их к пространству-времени, а не только к пространству.)

Конечно, признается, что открытия Римана и неевклидова геометрия нелегко доступны для понимания; однако, с другой стороны, человек, который игнорирует хотя бы последствия неевклидовой геометрии, не в состоянии обсуждать теорию Эйнштейна или проблему пространства даже с чисто философской точки зрения. Действительно, можно сказать, что философское значение неевклидовой геометрии даже больше, чем ее научное значение. Так всегда утверждали Лобачевский, Риман и другие великие математики.

Насколько известно автору, единственным философом, который упоминал неевклидову геометрию до открытий Эйнштейна, был Лотце; и Лотце выразил надежду, что философия никогда не позволит себе подчиниться ей. Но внимательное чтение сочинений Лотце по этому вопросу доказывает, что он имел очень поверхностное представление о том, что означает «кривизна». Его мнения, по-видимому, основывались на более или менее успешных попытках Гельмгольца популяризировать новую доктрину с помощью простых иллюстраций. К сожалению, эта тема слишком глубока, чтобы ее можно было объяснить в общих чертах. В любом случае, такое негативное отношение со стороны философов обернулось для них неблагоприятными последствиями, лишив их очень мощного понимания проблемы пространства.

Единственная цель, с которой мы привели эти несколько примеров (которых можно было бы привести *бесконечно много*), заключалась в том, чтобы показать, насколько осторожно мы должны относиться к критике выводов ученых, прежде чем приступить к приобретению более чем поверхностных школьных знаний о физических и математических фактах, которые они пытаются скоординировать. Если в результате неправильной интерпретации или незнания с нашей стороны мы знакомы только с небольшим количеством этих фактов, выводы ученых могут показаться странными и необоснованными; но следует помнить, что если бы все эти дополнительные факты, о которых мы не знаем, не были известны ученому, он, несомненно, никогда бы не пришел к выводам, которые так глубоко оскорбляют наши естественные представления.

К сожалению, во многих случаях эти факты не носят элементарного характера; их невозможно объяснить за час или около того. Чаще всего, чтобы понять, что они собой представляют, требуются годы предварительных исследований, поскольку они часто носят характер выводов, полученных из других фактов посредством трудоемкого математического анализа. Конечно, эти утверждения не следует толковать как применимые исключительно к теориям математической физики. Они в равной степени применимы к обсуждению многочисленных концепций, таких как бесконечность, непрерывность и атомизм, размерность, число, измерение, жесткость и т. д. Открытия в высшей математике и физике пролили новый свет на все эти предметы. Студенты, изучающие высшую

математику, слишком хорошо знают, насколько примитивным было их понимание непрерывности и бесконечности до того, как они узнали о математических открытиях Римана, Вейерштрасса, Кантора, Дедекинда и д-ра Буа Реймона. Кроме того, никто не может изучать высшую математику, не осознавая ее тесной связи с проблемами психологии, поскольку математика выявила формы мышления, о которых мы имели лишь смутное представление.

Коренная перестройка наших представлений о Вселенной, которую, по-видимому, делают неизбежной открытия Планка и Эйнштейна, делает понимание этих фундаментальных моментов крайне необходимым. Рассмотрим, например, квантовую теорию. Как мы увидим, ее необходимость возникает только тогда, когда мы принимаем во внимание ряд эмпирических открытий, относящихся к различным областям физической науки. Вот, например, нагретый корпус. Мы делаем в его стене отверстие размером с булавку и исследуем цвет и интенсивность выходящих световых лучей. Экспериментатор отмечает, что с повышением температуры цвет световых лучей постепенно меняется с красного на белый. Затем он изучает плотность энергии излучения и обнаруживает, что она пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры помещения, независимо от материала, из которого оно сделано. Это эмпирическое открытие известно как *закон Стефана*. Затем, разложив свет через призму, он обнаруживает, что излучение, демонстрирующее максимальную интенсивность, имеет частоту, пропорциональную абсолютной температуре. Это открытие вошло в *закон смещения Вина*. Таковы факты; физик выполнил свою задачу и теперь может уйти на покой. Каково значение этих фактов? Если бы наука ограничивалась лишь открытием и каталогизацией фактов, то больше нечего было бы делать. Но независимо от того, что могут сказать философы, наука не должна и не ограничивается такой скромной ролью. Открытия экспериментаторов передаются теоретическим исследователям, и именно они призваны интерпретировать их значение.

В данном случае выдающимися именами, связанными с проблемой излучения, являются Болцман, Вин, Рэле, Джинс и Планк, все из которых являются теоретическими физиками. Их целью было соотнести факты излучения с тем немногим, что было известно о явлении светового излучения. Эта задача включала математические вычисления, которые мы не имеем права критиковать, не обладая обширными знаниями в области математики; поэтому мы можем предположить, что эта часть работы не оспаривается критиками.

В результате этих вычислений было установлено, что невозможно согласовать факты, выявленные в ходе экспериментов, с любой теорией непрерывного излучения света. Всякий раз, когда предполагалось, что атомы в нагретом замкнутом пространстве излучают непрерывно, всегда следовало, что для любой заданной температуры максимальная интенсивность излучения должна быть найдена в бесконечно высоких частотах, а не в видимом спектре; отсюда следовало, что нагретое замкнутое пространство никогда не может излучать *видимый* свет. Это, конечно, противоречило общепринятому опыту. Литература по данной теме () насчитывает уже несколько лет. Были предложены различные объяснения несоответствия между теорией и опытом, но по той или иной причине ни одно из них не было признано удовлетворительным.

Затем Планк заметил, что если, вопреки всем предыдущим мнениям, предположить, что атомы в нагретом замкнутом пространстве излучают дискретные *кванты*, то можно получить математическую формулу излучения, полностью согласующуюся с экспериментом. Согласно расчетам Планка, необходимо было предположить, что свет излучается пучками, или квантами, обладающими энергией $h\nu$. В его выражении h представляет собой универсальную константу, называемую постоянной Планка, а ν представляет частоту света. Очевидно, что чем выше частота света, тем больше значение его

кванта энергии. Эти разрывы в излучении энергии света потребовали введения в теоретическое рассмотрение соображений вероятности и энтропии. Поскольку энтропия является сложным понятием, заимствованным из термодинамики, мы видим, что количество фактов, косвенно входящих в проблему излучения, значительно увеличилось. Очевидно, что было бы совершенно невозможно ни оправдать, ни критиковать гипотезу Планка с помощью каких-либо общих рассуждений, поскольку без помощи математических инструментов и знаний в области термодинамики и механики невозможно было увидеть какую-либо связь между прерывистым излучением и фактами, выявленными в ходе экспериментов; следовательно, необходимость гипотезы не могла быть оценена.

Однако до сих пор ничего революционного в этом не было. Все, что нам нужно было сделать, это предположить, что излучение света нагретым атомом было связано с разрушением некоторой внутриатомной структуры. Тем не менее, при более глубоком исследовании, даже предполагая, что теория излучения Планка верна, было отмечено ряд теоретических трудностей. Они носят настолько технический характер, что мы не будем на них останавливаться. Достаточно сказать, что они в общем плане связаны с обменом энергией между различными атомами и условиями равновесия. На этом этапе появляются имена Пуанкаре, Лоренца и Эйнштейна, и конечным результатом стало то, что где-то, каким-то образом, необходимо было ввести дискретность.

Следующий большой прорыв был сделан Эйнштейном. Он заметил, что хорошо известные аномалии в удельной теплоемкости тел при очень низких температурах можно объяснить, если предположить разрыв энергии. Применительно к твердым телам это означало бы, что колеблющиеся системы могут поглощать или излучать энергию только в виде определенных квантов; а применительно к газам мы должны были бы предположить, что молекулы могут вращаться только с определенными частотами. Все эти проблемы, связанные с удельными теплоемкостями, приводят нас к кинетической теории газов, а также к другим областям физики, таким как проблемы аномальной дисперсии и селективного отражения в оптике. Опять основывая свои выводы на существовании квантовых явлений, Эйнштейн вывел формулу для фотоэффекта, и эта формула оказалась в согласии с экспериментом. Наконец, можно упомянуть, что атом Бора, также основанный на той же идее дискретности, позволил ему объяснить некоторые спектральные ряды.

Теперь мы подошли к важному моменту. Из выражения для атома энергии или кванта $h\nu$, где h — константа, а ν — частота излучения, очевидно, что существует столько же различных типов квантов энергии, сколько существует различных частот излучения. В природе не существует единственного типа кванта энергии. Универсальным является не квант энергии $h\nu$, а константа h . Можно показать, что постоянная Планка h — это не просто число; она представляет собой некую определенную абстрактную математическую сущность, и эта сущность — *действие*.

Следовательно, мы должны предположить, что в природе существуют атомы действия, так же как существуют атомы материи. Но в чем заключается более глубокое значение этого атома действия? Прежде всего, имеет ли оно какое-либо глубокое значение, или его открытие сопоставимо с открытием какого-нибудь нового вида цветка или нового минерала? Но чтобы решить вопрос такого рода, мы должны иметь достаточно глубокое понимание того, что означает *действие*, а также той роли, которую эта важная сущность играет в науке. Действие — это весьма сложная концепция, взятая из аналитической динамики. Поэтому было бы абсурдно критиковать выводы ученых, какими бы они ни были, если мы не в состоянии обсудить многочисленные факты, которые были задействованы в их аргументах.

Ученые пришли к выводу, что атомарность действия влечет за собой гигантскую революцию в нашем понимании природы. Во-первых, законы механики, будь то законы классической науки или законы относительности, сводятся к принципу действия; таким образом, вмешиваясь в действие, мы вмешиваемся в основные законы механики. Следовательно, представляется, что наше понимание законов природы, несмотря на огромный прогресс, достигнутый благодаря теории относительности, все еще было слишком примитивным. Мы должны были бы наблюдать лишь макроскопические средние эффекты; более глубокие законы, лежащие в основе микроскопических, полностью ускользнули бы от нас. К подобным выводам, конечно, уже приходили и другими путями, например, в кинетической теории газов; но атомарность действия расширяет эти представления еще дальше. Она предполагает, что изменение всегда является дискретным; что система переходит из одного состояния в другое не непрерывно, а посредством серии рывков или скачков. Когда мы хотим решить, как будут следовать друг за другом эти скачки, невозможно сформулировать точные законы, и мы вынуждены прибегать к статистическим соображениям и вероятностям. В природе не прослеживается никакой жесткой детерминированной схемы или, по словам Вейля, «никакой причинности физической природы, основанной на строго точных законах». В микроскопическом мире мы, по-видимому, сталкиваемся с полным хаосом и анархией. Прошлое не влечет за собой настоящее, как это было бы в чисто детерминированной схеме. Свободная воля, по-видимому, царит повсюду, и единственным средством предвидения для нас является установление средних значений, как это делает компания по страхованию жизни, когда устанавливает свои страховые взносы. Статистика и вероятность, слепой случай и неопределенность заменяют жесткий детерминизм. Конечно, возможно, что дальнейший прогресс в наших знаниях позволит нам вновь обнаружить детерминированную схему под хаосом, который сейчас стоит перед нами. Но мы хотим подчеркнуть, что в нынешнем состоянии наших знаний нельзя занимать определенную позицию.

И это еще не все. Есть все основания полагать, что атомарность действия тесно связана с атомарностью материи, хотя точная связь между ними остается полной загадкой. Кроме того, когда мы осознаем, что «действие» содержит произведение пространства и времени или, если угодно, «элементы пространства-времени», и когда мы осознаем, что то, что математики называют «областями вероятности», теперь имеет конечную протяженность, а не сводится к точкам, возможность того, что пространство-время окажется атомарным, становится весьма вероятной. Невозможно предсказать, к чему это нас приведет, поскольку на карту поставлено все наше понимание природы. Как выражается Вейль: «Прежде всего, зловещие тучи тех явлений, которые мы с переменным успехом пытаемся объяснить с помощью кванта действия, бросают свою тень на сферу физических знаний, угрожая неизвестной новой революцией». Как мы уже упоминали, возможно, что пространство и время окажутся атомарными, или, опять же, что нам придется признать их приблизительными концепциями, от которых придется отказаться, когда речь заходит о бесконечно малом. Точно так же концепция температуры как результата возбуждения молекул теряет свой смысл, когда речь заходит о самих молекулах.

Что приготовит нам будущее, на данный момент может только догадываться. Но одно можно сказать наверняка: нас ждет гигантская революция, и новые идеи, несомненно, будут противоречить здравому смыслу, который рационалисты часто ошибочно приписывают «разуму». Но что, если это произойдет? Разве существование людей, ходящих вверх ногами на антиподах, не противоречило грубому здравому смыслу наших предков? Или, опять же, рассмотрим менее тривиальный пример волной теории света. Когда Френель защищал ее, Пуассон указал, что она подразумевает существование яркой тени за телом определенного размера, расположенным на определенном расстоянии от стены. На основании этого

аргумента Пуассон не согласился с точкой зрения Френеля. Однако когда эксперимент был действительно проведен, яркая тень была замечена. И почему Пуассон считал свой аргумент обоснованным? Потому что он был основан на здравом смысле; но мы видим, что этот инстинкт здравого смысла, который вводил его в заблуждение, ни в коем случае не был продуктом разума; он был основан лишь на частичном и грубом опыте.^[132] Вероятно, чем больше мы изучаем природу, тем больше здравый смысл нашего времени будет подвергаться неприятным потрясениям; и это вполне естественно, поскольку чем более утонченными становятся наши исследования, тем дальше мы будем отходить от привычного мира обычного опыта.

Возвращаясь к новым идеям, которые возникают в результате квантовой теории, мы видим, что, исходя из фактов, которые по общему согласию должен устанавливать физик, мы постепенно через серию теоретических выводов приходим к соображениям, которые граничат с метафизикой. Но в то время как метафизик будет утверждать *априорное* знание или же, признает он это или нет, будет выводить свои знания из самых грубых фактов повседневного опыта, теоретический ученый будет основывать свои выводы на чрезвычайно точных наблюдениях, охватывающих все явления, известные науке.

По этой причине эти выводы будут составлять знание, поскольку знание проистекает из *точного* исследования *большого* количества фактов, не исключая тех, которые были выявлены в ходе сверхточных экспериментов. Точнее говоря, знание о природе состоит в координации всех известных фактов, и эта координация должна осуществляться таким образом, чтобы объяснять явления не просто каким-то неопределенным качественным образом, а с максимальной точностью. Только после того, как будет выполнен этот предварительный синтез, можно будет сделать общие философские выводы. До тех пор все, что мы можем делать, это гадать, и прошлый опыт доказывает, что в девяноста девяти случаях из ста наши догадки будут неверными.

Короче говоря, научный метод отличается от всех других методов точностью, с которой изучаются и координируются факты, а также количеством рассматриваемых фактов. В этом заключается его превосходство. Если бы великие ученые ограничились общими разговорами, основанными на грубом обзоре ряда заметных фактов, мы, возможно, до сих пор защищали бы идею Платона о том, что земля, воздух, огонь и вода составляют четыре элемента, или утверждение Аристотеля о том, что небесные тела описывают круги, потому что круговое движение является самым благородным из движений, или, опять же, убеждение Канта, что аксиомы геометрии имеют характер *априорных* синтетических суждений, и так далее.

Таким образом, можно понять, что обсуждение философского значения открытий физической и математической науки должно быть оставлено теоретическим физикам и математикам. Только они, благодаря своим обширным знаниям фактов и владению строгим математическим способом мышления, способны координировать, казалось бы, не связанные между собой результаты, полученные опытом и разумом. Если же речь идет о достижении сверхфилософии, то, по-видимому, наиболее успешные результаты будут получены в результате совместной работы ученых из различных областей знания. Такое сотрудничество постоянно продолжается. Достаточно упомянуть вклад таких физиков, как Эйнштейн и Нернст, в решение проблем физической химии; а физическая химия тесно связана с химией коллоидов, а значит, и с химией живых организмов. Все эти области науки,

от математики до психологии, взаимосвязаны, о чем свидетельствуют такие термины, как биохимия, психофизика и физическая химия.

Можно возразить, что результаты, воплощенные в специальных науках, не охватывают всю природу; что существуют разум и сознание, эмоции, ценности качества, религиозные инстинкты и так далее. Но здесь следует помнить, что все, что выходит за пределы сферы специальных наук, выходит за ее пределы именно потому, что является неопределенным и лишь смутно осознаваемым. А когда факты настолько расплывчаты и плохо установлены, что не поддаются научному методу, мы обычно обнаруживаем, что существует так много разных способов их слабой координации, что практически любое мнение может быть выражено с одинаковой степенью правдоподобия. В результате мнение мудрого человека находится на одном уровне с мнением невежды.

Если мы хотим продвинуться вперед, то, по-видимому, лучшим методом будет начать с рассмотрения фактов, о которых мы знаем что-то определенное, а не наоборот. Результаты, воплощенные в специальных науках, настолько многочисленны и (относительно говоря) настолько хорошо установлены, что мы не можем позволить себе серьезно рассматривать любую философскую систему, которая вступает с ними в противоречие или игнорирует их.

В любом случае, учитывая, что в нынешнем состоянии наших знаний любая координация фактов может быть только крайне фрагментарной, можно предположить, что теоретические ученые, продемонстрировавшие столь заметные способности в координации фактов природы, являются людьми, наиболее подходящими для построения философии природы. Поэтому не следует удивляться, что их изучение природы привело их к философии, которую, за очень редким исключением, они все разделяют.

В настоящей главе мы обсудим методологию вместе с философскими взглядами, которые принимаются подавляющим большинством теоретических физиков. В частности, выраженная философия будет проиллюстрирована позицией двух ведущих ученых нашего поколения: Пуанкаре как математика и Эйнштейна как физика.

Проблема знания, хотя и рассматривается, как правило, независимо от собственно науки, тем не менее настолько связана с научными соображениями (некоторые из которых отнюдь не элементарны), что представляется необходимым подходить к ней с помощью обычных методов научного исследования. Под знанием мы не хотим подразумевать наше голое осознание ощущений, которые, вероятно, червь и устрица разделяют с человеком. Ощущения являются одним из первоначальных источников знания, но знание подразумевает гораздо больше; в знание входят суждения и выводы, и знание является конструкцией или координацией, в которую наши ощущения входят лишь как фундаментальные элементы. Например, когда в результате наших зрительных и тактильных ощущений мы признаем, что перед нами стоит стол, мы утверждаем знание; но зрительные и тактильные впечатления сами по себе не составляют знания.

Естественным некритическим взглядом было бы предположить, что знание дается непосредственно посредством восприятия. Таким образом, когда мы видим стол, мы знаем, что он существует «здесь и сейчас» в пространственно-временном контексте. Но если мы проанализируем ситуацию, мы не сможем согласиться с этой точкой зрения, поскольку наше признание существования стола и его положения в пространстве и времени, по-видимому, происходит гораздо более сложным образом, чем может показаться при беглом рассмотрении. То, что мы действительно ощущаем, — это совокупность цветов с четко очерченными контурами. Только когда мы хотим приписать этим ощущениям причину, в наше сознание приходит идея стола. Но и в этом случае, в поиске причины, только с учетом прошлого опыта, с учетом ассоциации идей, мы считаем оправданным постулировать

существование стола, расположенного здесь и сейчас в пространственно-временном контексте. Наше суждение может быть правильным, но оно может быть и ошибочным, как это было бы в случае, если бы мы смотрели на искусно написанную картину или на изображение стола в зеркале. Независимо от таких возможных ошибок в суждении, главное заключается в том, что существует явное различие между нашим осознанием зрительных ощущений и нашей верой в наличие стола, расположенного там и сейчас в пространстве. В то время как зрительные ощущения не влекут за собой как неизбежное следствие существование стола, наша вера в его существование предполагает наше осознание определенных сенсорных впечатлений или их запоминание, поскольку в противном случае у нас не было бы оснований постулировать существование стола. По этой причине мы должны отдать предпочтение нашему осознанию ощущений перед так называемыми непосредственными проявлениями восприятия, так же как мы должны отдать предпочтение признанию экспериментальных фактов перед научными теориями, построенными с целью их координации. Соответственно, мы будем называть наше осознание ощущений фактами.

Дальнейшая иллюстрация может прояснить этот момент. Например, мы чувствуем жару и восклицаем: «Какой теплый день!» Наше осознание ощущения жары составляет фундаментальный факт, но наше утверждение, что день теплый, является лишь выводом. Мы можем проверить теплоту атмосферы с помощью термометра, а значит, мы можем проверить верность нашего вывода, но мы не можем проверить наше осознание тепла. Чувство тепла может быть вызвано температурой воздуха, лихорадкой или просто воображением, но, независимо от его причины, мы знаем, что нам тепло, и наша уверенность в этом факте не может быть ни оспорена, ни проанализирована.^[133]

С другой стороны, мы испытываем очень похожие ощущения, когда наша кожа соприкасается с веществом высокой температуры или с жидким воздухом. Если из этого сходства в наших ощущениях мы сделаем вывод об идентичности соответствующих температур, то мы введем себя в заблуждение; но виноваты будут наши выводы, а не ощущения, которые существуют независимо от того, делаем ли мы из них выводы или нет.

Едва ли стоит упоминать, что те философы, которые отрицают правомерность только что высказанных взглядов, утверждая, что наше знание о внешней реальности является результатом непосредственного восприятия, оказываются в очень затруднительном положении, когда речь заходит о таких обычных явлениях, как зеркальные образы. Им легко говорить, что результаты зрительного восприятия могут потребовать последующей корректировки путем изменения условий наблюдения и учета всех других восприятий. Но дело в том, что если это зрительное восприятие следует рассматривать как непосредственное отражение реальности, т. е. как фундаментальное, то его результаты должны быть бесспорными, и их корректировка была бы бессмысленной. Ведь мы можем корректировать данные только на основании других критериев, которые затем автоматически считаются более фундаментальными. В данном случае аргумент философа указывает на то, что результат координации восприятий в целом следует считать более фундаментальным, чем простое зрительное восприятие или простое слуховое восприятие и т. д. Но поскольку ни одно из отдельных восприятий, входящих в координацию, не может быть принято без возможной опасности исправления, мы должны вернуться дальше, за пределы отдельных восприятий, к ощущениям, признание которых не запятнано никакими следами умозаключений. Тогда мы приходим к нашему первоначальному выводу, а именно, что знание проистекает не из координации восприятий, а из координации ощущений.

Рассмотрим другой пример. Неореалист, вероятно, заявил бы, что когда мы говорим: «Я слышу колокол», в это знание не входит никакой элемент умозаключения. Но утверждение

такого рода, конечно, было бы несостоятельным, поскольку единственная причина, по которой слуховое ощущение дает нам какое-либо знание о колоколе, заключается в том, что, ввиду ассоциации идей, вытекающих из прошлого опыта, мы стали связывать определенный класс слуховых ощущений с присутствием колокола. Человек, который видел колокола, но никогда не слышал их звона, не стал бы связывать этот звук с колоколом, так же как человек, который никогда не сталкивался с гремучими змеями и не слышал о их существовании, никогда не сказал бы: «Я слышу гремучую змею». С другой стороны, человек, который ранее сталкивался с этими рептилиями, с такой же вероятностью сказал бы: «Я слышу гремучую змею», как философ сказал бы: «Я слышу колокол». Очевидно, что в основе этого знания лежит прошлый опыт, а не непосредственное распознавание. В отсутствие прошлого опыта все, что мы могли бы сказать, это «Я чувствую звук», а затем попытаться описать этот звук, воспроизведя его как можно точнее с помощью языка и губ.

С визуальными восприятиями наши выводы будут точно такими же, но на первый взгляд может показаться, что проблема была немного другой, потому что даже если бы мы никогда раньше не видели змею, мы все равно могли бы сказать: «Я вижу существо с длинным, тонким телом», а затем придумать для него какое-нибудь название. Но следует помнить, что, хотя мы, возможно, никогда раньше не видели змею, змея является частным случаем объекта, и, если мы не были слепыми с рождения, мы видели объекты с самого детства. Итак, если мы хотим найти аналогию с случаем гремучей змеи (как мы применили ее к слуховым восприятиям), мы должны начать с слепого человека, который ощущал объекты, но никогда их не видел. Затем, предположив, что он внезапно обрел зрение, возникает вопрос: сможет ли он сразу, путем интуиции, отождествить цвета и формы, которые он теперь видит, со столом, который он ранее исследует руками. Именно в этом мы имеем все основания сомневаться. Теперь мы можем перейти к более подробному обсуждению проблемы знания.

Здесь следует четко понимать, что мы просто пытаемся установить иерархию знаний в соответствии с психологическим порядком, в котором, по-видимому, возникло человеческое знание. Мы можем поэтому считать, что способность неразумного чувственного восприятия предоставляет исходные данные, которые необходимо принять, прежде чем мы сможем продолжить свои размышления. Наряду с нашим осознанием ощущений мы должны учитывать наше осознание мыслей или идей. Вопрос о том, возникли бы мысли в отсутствие ощущений, нас не интересует. В любом случае, ответить на него, по-видимому, невозможно, поскольку мы не можем изучать мысли живого тупа.

Далее мы должны рассмотреть наше осознание хода времени. Это осознание, по-видимому, тесно связано со способностью памяти. Действительно, только благодаря памяти ощущений или идей мы можем отличать настоящее от прошлого. Поэтому вероятно, что для существа, лишенного всяких следов памяти, для существа, ощущающего только настоящее, прошлое и будущее не имели бы никакого значения, а ход времени был бы невыносим. Опять же, вопрос о том, останется ли что-нибудь, что можно вспомнить, в отсутствие нашего осознания ощущений или идей, не стоит нас задерживать. Причина этого упущения, конечно, заключается в том, что в настоящем исследовании мы рассматриваем нормальных людей, у которых, как известно, существует осознание ощущений, идей и течения времени.

Наше признание одновременности двух ощущений является фундаментальным, поскольку оно не поддается дальнейшему анализу. Такая же фундаментальная природа должна быть присуща нашему признанию последовательности ощущений или идей. По этой причине ощущение одновременности и последовательности (когда речь идет о нашем осознании ощущений или идей, а не, конечно, об одновременности пространственно разделенных событий) должно служить основой для последующего знания.

Мы также должны упомянуть наши суждения о постоянстве, неизменности или одинаковости. Таким образом, мы признаем два ощущения или две группы ощущений идентичными или, опять же, судим о них как о сохраняющихся без изменений во времени. Хотя все эти, казалось бы, *априорные* основные источники информации имеют совершенно разную природу, мы можем рассматривать их как единое целое в наших будущих обсуждениях.

Теперь, если бы люди ограничивались регистрацией сенсорных впечатлений и ощущением течения времени, никогда бы не возникло такое явление, как научное знание или даже грубое обыденное знание. Так или иначе, исходные факты должны были быть скоординированы и взаимосвязаны. Только так могла стать возможной связная форма знания, ведущая к предвидению. Именно этому синтезу наших сенсорных впечатлений, дополненному упомянутыми нами фундаментальными формами распознавания, мы обязаны нашей верой во внешнюю вселенную пространства, материи, силы и цвета. В этой вселенной время считалось текущим, события рассматривались как проявляющие причинно-следственные связи, а наши сенсорные впечатления приписывались общим причинам, существующим в общедоступной объективной вселенной.

Вероятно, вера в причинно-следственные связи возникла из нашей способности произвольно создавать и останавливать определенные сенсорные впечатления посредством сознательного действия нашей воли. Таким образом, мы «желаем» определенного усилия (которое, как оказывается, соответствует закрытию наших глаз), и световое впечатление прекращается. Отсюда был всего один шаг до распространения нашей веры в причинно-следственные связи на последовательности событий во внешнем мире, даже несмотря на то, что в этом случае человеческая воля, как было известно, не играла никакой роли. То же самое и с силой. Хотя изначально она была предложена нашим осознанием усилия, вскоре она была экстернализирована и ей было приписано существование во внешнем мире; и похожий процесс экстернализации, по-видимому, был ответственен за нашу веру в физическое время (уже не поток «я» нашего сознания), во время, считающееся постоянным во внешней вселенной, независимо от нашего присутствия.

Не представляется особо интересным задаваться вопросом, были ли оправданы эти экстернализации дегуманизированных концепций причинно-следственной связи, силы и времени. В любом случае нельзя отрицать, что экстернализация причинно-следственных связей, например, оказалась неоценимой услугой, позволившей нам объяснить рутину нашего опыта. В этом и заключается ее оправдание, поскольку причинность кажется незаменимым условием для понимания последовательности явлений и, следовательно, для возможности предвидения. Но было бы не совсем правильно утверждать, что понимание навязывает причинность безразличному миру, поскольку, как мы знаем, есть области науки, в которых, хотя и можно подозревать наличие причинных связей, ни одна из них еще не была установлена.

В конце концов, мы приходим к вопросу о природе этого синтеза или координации фактов, который, по-видимому, является необходимым условием для возможности познания. Именно здесь анализ более сложных синтезов науки поможет нам понять, как работает ум. Причина этого заключается в том, что научное знание можно проследить до грубого обыденного знания через ряд незаметных переходов, причем во всех случаях действуют одни и те же стимулы.

Теперь, когда мы рассматриваем процедуру ученого, мы обнаруживаем, что она состоит в рациональной координации и связывании между собой ряда экспериментальных фактов с

максимальной простотой. Под «рациональным способом» мы подразумеваем в первую очередь «в соответствии с правилами логики». Независимо от того, считается ли, что эти правила были выведены из опыта или сводятся к *априорным* суждениям, все нормальные люди обращаются к ним, и все научные теории, даже самые революционные, основаны на их принятии. Что касается критерия простоты, который позволяет нам выбрать одну координацию, а не другую, то он, по-видимому, связан с нашей оценкой затрат усилий. Так, даже собаке проще войти в дом через парадную дверь, чем залезть через заднее окно. В любом случае, поскольку, за небольшими исключениями, все люди единодушно согласны с тем, какие координаты следует считать самыми простыми, мы можем предположить, что стремление к простоте является фундаментальным. Конечно, существует ряд других факторов, которые влияют на построение научных синтезов, но для наших целей достаточно упомянутых выше.

Следует отметить, что в нашем списке фундаментальных фактов, хотя наше сознание прохождения времени () считалось не поддающимся анализу, не было упомянуто наше сознание пространства и объектов, включая наши собственные человеческие тела, расположенные в пространстве. Предполагалось, что концепция пространства была сформирована косвенным образом, когда мы стремились скоординировать наши сенсорные впечатления с максимальной простотой. Таким образом, оно было бы по своей природе ментальным конструктом, полученным *апостериорно*. Этим мы не хотим сказать, что концепция непрерывности и протяженности не могла существовать в уме в латентной форме; все, что мы хотим утверждать, это то, что необходимость обращения к концепции пространства, по-видимому, возникла из совокупности нашего сенсорного опыта.

Координация наших ощущений дает нам одновременно пустое пространство и то, что мы интерпретируем как заполненное пространство, представляющее материальные объекты, включая наши собственные человеческие тела, которые затем распознаются как расположенные в пространстве. Мы не можем пытаться обосновать эти взгляды здесь, но те, кто интересуется этой темой, найдут идеи, изложенные в мастерском обсуждении этой проблемы Пуанкаре в его книге «Значение науки» и, в особенности, в «Последних мыслях».

Когда речь заходит о различении и локализации частей заполненного пространства, занятых телами, в отличие от пустых частей, мы снова поступаем таким же образом, координируя сенсорные впечатления. Наша вера в существование стола, например, объясняется тем, что простая координация комплекса наших тактильных, зрительных и мышечных сенсорных впечатлений возможна только тогда, когда мы признаем существование стола как конкретной реальности, расположенной в пространстве перед нами. Правда, в обычной практике мы можем видеть стол и распознавать его как таковой, не прикасаясь к нему. Но следует предположить, что на более ранних этапах нашей жизни мы использовали все наши сенсорные способности и уже распознали посредством синтетического процесса существование пространства и материальных объектов. Стол тогда сразу же распознается как существующий, путем простой ассоциации прошлых впечатлений, без необходимости исследовать его тактильно.

До этого момента мы ограничивали свое внимание пространством как простой протяженностью. Но пространство, как его понимают в обычной практике, подразумевает гораздо больше: оно представляет собой трехмерное евклидово континуум. При таком конкретизировании аргументы Канта относительно его *априорного* характера больше не являются обоснованными в свете современных открытий; и мы должны предположить, что эта особая форма, которую мы приписываем пространству, возникает исключительно из нашей координации сенсорных впечатлений, проводимой самым простым из возможных

способов. Ни в коем случае мы не можем считать трехмерное евклидово пространство *априорным*, навязанным либо чувственностью, либо разумом.

Эти дискуссии об эмпирическом происхождении пространства не являются просто философскими фантазиями, не имеющими отношения к науке. Они во многих отношениях жизненно важны; и ученые в целом признают, что *априорная* доктрина трехмерного евклидова пространства является одним из самых пагубных учений, которые философия когда-либо пыталась навязать науке. Аналогичные аргументы применимы и к «времени», когда под «временем» мы имеем в виду не наше осознание потока времени в нашем сознании, не время «я», а физическое время или продолжительность во всей вселенной, которое наше сознание экстернализировало и проецировало в пространство. Как отмечает Эйнштейн в ранее процитированном отрывке:

«Я убежден, что философы оказали пагубное влияние на прогресс научного мышления, вынеся некоторые фундаментальные концепции из области эмпиризма, где они находятся под нашим контролем, в неосязаемые высоты *априорного*. Это особенно верно в отношении наших концепций времени и пространства, которые физики были вынуждены спустить с Олимпа *априорного*, чтобы скорректировать их и привести в пригодные для использования условия».

Можно отметить, что эти взгляды на пространство, исповедуемые величайшими учеными, в значительной степени объясняются открытиями неевклидовой геометрии, дополненными исследованиями психофизиков. Тем не менее, учитывая сложность представления гиперпространств и неевклидовых пространств, представленные взгляды могут показаться трудноприемлемыми, и можно считать, что трехмерное евклидово пространство навязывается *априори*, независимо от экспериментов. Однако следует отметить, что к тому времени, когда люди достигают возраста, позволяющего им заниматься философией, они на протяжении многих лет подвергаются воздействию убеждений, основанных на выводах из опыта, и эти убеждения остаются, в то время как выводы, благодаря монотонности их повторения, становятся второй натурой и кажутся интуитивными.

И все же достаточно одного мгновения размышления, чтобы убедиться: если бы трехмерное евклидово пространство было *априорным* условием понимания, математикам было бы совершенно невозможно проложить путь через неевклидовые гиперпространства относительности. Трехмерное пространство также нельзя считать навязанным чувственностью, поскольку, как говорит нам Пуанкаре, после определенной настойчивости ему в значительной степени помогла чувственность при исследовании проблем анализа ситуса четырех измерений.

Это эмпирическое происхождение пространственного понятия подчеркивается Эйнштейном в следующих строках:

«Теперь мы подошли к нашим понятиям и суждениям о пространстве. Здесь также необходимо уделить пристальное внимание связи опыта с нашими понятиями. Мне кажется, что Пуанкаре ясно осознавал истину в том, что он изложил в своей книге «La Science et l'Hypothèse». Среди всех изменений, которые мы можем воспринимать в твердом теле, те, которые отличаются своей простотой, могут быть обращены вспять произвольным движением тела; Пуанкаре называет их изменениями положения. С помощью простых изменений положения мы можем привести два тела в соприкосновение. Теоремы о конгруэнтности, фундаментальные в геометрии, имеют отношение к законам, которые управляют такими изменениями положения».

Когда мы осознаем, что именно эти законы, регулирующие изменения положения, определяют наш выбор пространства среди всех тех, которые предлагает математик, мы видим, насколько мы зависим от опыта при рассмотрении проблемы пространства.

Мы можем представить эти проблемы в более наглядной форме. Предположим, что все, что мы когда-либо видели в мире, было дано его изображением в отражающей сферической поверхности, такой как большая дверная ручка. Мир нашего зрительного восприятия был бы очень отличен от того, в котором мы обычно живем ; формы объектов изменялись бы самым разным образом, когда мы перемещали бы их перед изогнутым зеркалом. И все же, каким бы отличным ни казался наш мир от мира обычного наблюдения, в конце концов мы смогли бы скоординировать наши восприятия. Мы по-прежнему будем представлять себе внешнее пространство, но это пространство больше не будет евклидовым. Если же вдруг зеркало будет убрано, и мы увидим мир таким, каким его воспринимают другие люди, мы будем полностью растеряны, привыкшие к законам нашего неевклидова мира. Фактически, ситуация была бы очень похожа на ситуацию человека, который пытается ехать на велосипеде по оживленной улице, скрестив руки на руле. Вероятно, он потерпел бы неудачу; и все же, если бы он всегда ездил на велосипеде таким странным образом, ему было бы так же трудно изменить свои привычки и ездить на велосипеде нормальным образом.

Подводя итог, можно сказать, что вера в существование внешней вселенной, состоящей из пространства, материи и изменений, является результатом синтеза сенсорных впечатлений. Эти выводы, которые относятся к общеизвестным знаниям, будут подтверждены далее, когда мы рассмотрим примеры, взятые из более продвинутых областей знаний ученых. Как упоминалось ранее, невозможно провести черту и сказать: «Здесь начинаются научные знания и заканчиваются общеизвестные знания». А поскольку методы ученого легче проанализировать, изучение процедуры ученого не может не пролить свет на более туманную проблему генезиса обычных знаний.

В научных синтезах мы не ограничиваемся координацией простых сенсорных впечатлений; мы также должны координировать научные факты. Но научные факты сами по себе являются результатом предыдущей координации других научных фактов, а те, в свою очередь, восходят к координации сенсорных впечатлений. Несколько примеров, взятых наугад из науки, проясняют эти моменты. Почему, например, астроном утверждает, что Солнце имеет сферическую форму?

Как мы знаем, это делается для того, чтобы объяснить постоянный круглый вид солнечного диска, прохождение солнечных пятен, их уплощенный вид при приближении к краям солнца, что позволяет предположить, что они видны в перспективе, выпуклость его экватора, эффект Доплера, проявляющийся на его экваториальном крае, яркость планет, когда они освещены сбоку. Это также необходимо для того, чтобы сделать форму солнца совместимой с его текучей природой, обусловленной высокой температурой. Другими словами, цель ученого состоит в том, чтобы сформулировать единую гипотезу, которая позволит ему скоординировать это широкое разнообразие фактов. Можно отметить, что все факты, которые астроном пытается скоординировать, предполагают знание пространства и материальных объектов, расположенных в пространстве. Но, конечно, мы предполагаем, что к тому времени, когда люди начали беспокоиться о форме Солнца, они уже вышли за пределы примитивной стадии признания существования объектов в пространстве. Теперь, когда мы решаем, что Солнце имеет сферическую форму, наш первый аргумент основан на его круглом виде. Чтобы объяснить это, мы обращаемся к вероятности, утверждая, что очень маловероятно, чтобы Солнце всегда поворачивалось к нам одной и той же стороной. Конечно, сам по себе этот аргумент не имеет большого веса, поскольку он опровергается в случае с Луной. Тем не менее, он служит, по крайней мере, предположением.

Далее рассмотрим случай планет. Если бы солнце было плоским диском, было бы странно, что их яркость остается практически одинаковой независимо от их положения относительно солнца. Но этот аргумент, следует отметить, весьма сложен, поскольку естественным было бы предположить, что все яркие точки на небе сияют сами по себе, и не было бы никаких оснований различать планеты, отражающие солнечный свет, и звезды, которые никоим образом не зависят от присутствия солнца. Только на более позднем этапе возникла необходимость различать звезды и планеты. Короче говоря, факты, которые астроном пытается скоординировать, имеют весьма сложный характер; только когда мы все больше и больше их анализируем, анализируя предыдущие синтезы науки, мы в конечном итоге возвращаемся к нашему непосредственному восприятию чувственных впечатлений. Таким образом, мы видим, что наука представляется бесконечной серией синтезов других синтезов, но в каждом случае синтетический метод остается тем же.

Перейдем теперь к менее простому примеру, а именно: «Мы знаем, что молекулы существуют». В случае существования стола или стула нам нужно было только скоординировать определенные непосредственные сенсорные впечатления. В случае с формой солнца процедура была более сложной, поскольку мы не могли исследовать его поверхность руками и только путем умозаключений пришли к выводу, что мы видим сферический объект с разных позиций в течение дня или года. Но с молекулами дело обстоит гораздо хуже, поскольку никто их даже не видел и не ощущал. Выводы, к которым мы приходим, основаны на других выводах, а эти выводы, в свою очередь, основаны на других. Таким образом, вероятность того, что наша координация окажется несовместимой с будущими открытиями, увеличивается, и по этой причине наше знание о молекулах теряет большую часть своей определенности. Однако, если не считать вопросов степени, это знание было получено точно таким же образом, путем создания простейшего рационального синтеза, способного скоординировать широкий спектр фактов наблюдений и опыта.

Вероятно, на очень отдаленном этапе истории человечества люди заметили разницу в текстуре между песком, который был зернистым, и водой, которая казалась однородной и гладкой. Для них было бы естественным задаться вопросом, не окажется ли вода зернистой при микроскопическом рассмотрении. Одни предполагали одно, другие — другое. Однако существовал ряд элементарных фактов наблюдения, которые необходимо было принимать во внимание. Например, явление, на которое греческие мыслители обращали особое внимание, заключалось в способности вина и воды смешиваться. Самым простым объяснением этого было предположение, что вода и вино состоят из отдельных частиц, которые меняются местами, подобно тому, как два порошка, один черный, а другой белый, при встряхивании дают однородную серую смесь.

Но Демокрит пошел дальше. Демокрит, по-видимому, был человеком с исключительными научными способностями (по меркам того времени); ему приписывают геометрическое решение задачи о объеме пирамиды и конуса, а Плиний упоминает, что он провел всю свою жизнь, занимаясь экспериментами. В любом случае, он, по-видимому, был первым мыслителем древности (и одним из немногих), проявившим научный дух, стремясь найти единство в различных проявлениях природы путем сведения качества к количеству. В этом отношении он положил начало тому, что впоследствии стало необходимым методом научного исследования. Соответственно, он предположил, что все элементарные частицы материи состоят из одного и того же вещества. Качественные различия, которые проявляют тела, тогда будут обусловлены различиями в формах и размерах их составных элементов или атомов. Таким образом, единство было возможным; но для того, чтобы это единство сохранялось, было необходимо, чтобы эти элементарные атомы сами по себе составляли

неразрушимые единицы. Они не могли быть микрокосмами, внутренние части которых могли бы подвергаться изменениям положения; следовательно, они должны были быть неделимыми *plena*. Что касается когезии, то она объяснялась тем, что атомы цепляются друг за друга.

Как научное стремление, схема Демокрита была совершенна, но проблема заключалась в том, что известных ему фактов было слишком мало. Поэтому его теория была в лучшем случае грубым предположением, и было вполне естественно, что более широкое исследование фактов сделало ее несостоятельной. Сопоставление фактов, известных современной науке, действительно доказало, что атомизм, как его понимал Демокрит, был несостоятелен; ведь в то время как за атомом греков не было никакой тайны, ничего, что стоило бы искать дальше, теперь известно, что атомы материи делимы. Они качественно отличаются друг от друга, содержат гетерогенности, подвержены изменениям и распаду. Другими словами, атомы современной науки — это новые микрокосмы озадачивающей сложности, так что название «атом» (означающее «*неделимый*» по-гречески), сохранившееся по традиции, больше не является уместным. Когда мы выходим за пределы атомов к электронам и протонам, мы не можем утверждать, что они составляют неразрушимые единицы. Возможно дальнейшее деление, и было высказано предположение о существовании субэлектронов. Мы не знаем, что произошло бы, если бы можно было вызвать слияние протона и электрона — привело бы это к полному уничтожению электричества и материи или нет. Даже если мы придерживаемся мнения, что с этими электронами и протонами наконец-то достигнуты конечные атомы, мы знаем о них так мало, что не можем даже быть уверены, что они обладают определенным размером или формой. Они могут простирались до бесконечности, они могут сводиться к математическим точкам или сингулярностям в электромагнитном поле; и это поле само по себе ни в каком смысле не является субстанцией. Итак, мы видим, что атомизм, отстаиваемый Демокритом, далек от того, чтобы быть установленным современной наукой. При нынешнем состоянии наших знаний все, что мы можем сделать, — это гадать, как делал Демокрит в свое время; но, учитывая скудность фактов, которые могли бы нас направить, наши догадки не представляют никакого интереса.

Тем не менее, если под атомизмом мы понимаем лишь тенденцию материи и электронов объединяться в очень стабильные образования, то мы находимся на твердой почве и можем считать эту доктрину доказанной. Если понимать атомизм в этом более узком смысле, то к атомной теории нас подталкивает целый ряд явлений. Помимо смешивания жидкостей, упомянутого греками, мы должны учитывать диффузию газов и растворов, сжимаемость газов и явление осмоса. Все эти явления, по-видимому, требуют существования молекул или атомов. В качестве иллюстрации рассмотрим явление сжимаемости газов, изученное Бойлем в XVII веке. Мы знаем, что при сжатии газа его объем уменьшается. Однако его масса или вес остаются неизменными. Поэтому мы не можем предположить, что вещество исчезло в результате сжатия; простейшим вариантом является предположение, что газ состоит из атомов, плавающих или движущихся в пустоте. Сжатие приведет к сгущиванию этих атомов в меньших пространствах, при этом их общее количество останется неизменным. Аналогичные аргументы можно привести в случае жидкостей. Так, когда мы смешиваем одну пинту спирта и одну пинту воды, мы не получаем две пинты смеси, а значительно меньше. Самый простой способ объяснить это частичное исчезновение объема — снова предположить, что наши жидкости имеют зернистую структуру и что между зернами или молекулами существуют пустые пространства. Тогда мы можем предположить, что при смешивании воды и спирта некоторые молекулы воды вдавливаются в пустоты между молекулами спирта, или наоборот. Опять же, мы видим, как атомизм проникает в химию, когда Дальтон пытался объяснить эмпирический закон постоянных пропорций. Тем

не менее, хотя корпускулярная природа материи казалась неизбежной, если мы хотели скоординировать большое количество явлений, для безоговорочного принятия этой гипотезы требовалось нечто большее.

Основная причина современной веры в атомарность проистекает из следующих соображений: знаменитая гипотеза Авогадро, обоснованность которой мы не будем здесь обсуждать, предполагала, что если молекулы существуют, то равные объемы всех газов, поддерживаемых в одинаковых условиях давления и температуры, должны всегда содержать одинаковое количество молекул. Это число, называемое *числом Авогадро* N , было взято для случая, когда выбранный объем составлял один кубический сантиметр, температура — ноль градусов по Цельсию, а давление — 760 миллиметров ртутного столба. Затем в результате сложных математических вычислений было показано, что, если молекулы существуют, на широкий спектр явлений должно влиять точное значение числа Авогадро. Эти явления касаются броуновского движения в жидкостях (Эйнштейн), вязкости газов (Максвелл, Больцман, Эйнштейн), голубого цвета неба (Рейли, Кисом), равновесного излучения (Планк), удельной теплоемкости твердых тел (Эйнштейн), явления критической опалесценции (Смолуховский) и многих других явлений, которые не стоит упоминать. Точные наблюдения и эксперименты, проведенные над этими явлениями, должны поэтому позволить нам вывести значение числа Авогадро. Результаты всех этих экспериментов были поразительно согласованными, всегда давая одно и то же значение. Поскольку это число достигает квинтиллионов (2.70×10^{19}), было практически невозможно объяснить такое удивительное совпадение простой случайностью; поэтому мы были вынуждены прийти к выводу, что наши предположения были верны и что существование молекул было доказано. После этого было легко определить их массу и получить информацию об их размерах и других характеристиках.

Хотя мы, возможно, повторяемся без необходимости, мы должны еще раз обратить внимание на тот факт, что это знание о молекулах, полученное путем координации экспериментальных результатов, во всех отношениях (кроме степени достоверности) является таким же, как наше знание о сферической форме Солнца или наше знание о пространстве и столе. С другой стороны, оно существенно отличается от нашего осознания ощущения жара или усталости.

Наконец, рассмотрим последний пример, а именно наше убеждение в том, что свет является атомным. В этом случае наши знания еще более неопределенны. Обоснование веры в кванты было получено Планком (как мы уже объясняли в другом месте) и возникло из-за особого явления излучения черного тела. Математическое решение проблем такого рода основано на исчислении вероятностей. Когда расчеты проводились на основе предположения о непрерывном излучении света, мы получили *закон излучения Рэлея*, который был опровергнут фактами. Планк заметил, что, заменив непрерывные вероятности на прерывистые, результаты наблюдений можно было бы предсказать с большой точностью. Когда несколько лет спустя Нернст, а затем Эйнштейн показали, что распространение этих же прерываний на энергию молекулярных движений объясняет странные аномалии и колебания удельной теплоемкости газов и твердых тел, а Эйнштейн, кроме того, сумел с высокой точностью объяснить фотоэлектрический эффект, идеи Планка стали казаться все более вероятными. Эта вера еще более укрепилась, когда Бор представил науке свою модель атома, излучающего кванты.

С другой стороны, существовал ряд явлений, которые квантовая теория не могла объяснить. Были наблюдаемы интенсивности света, меньшие чем квант, а интерференция световых волн, казалось, указывала на непрерывность, а не на прерывность излучения. Требуется более общая синтеза, объединяющая эти две противоречивые формы; и до тех пор, пока такая синтеза не будет сформулирована, мы едва ли можем утверждать, что существование квантов установлено бесспорно.^{[\[134\]](#)}

Цель этих различных иллюстраций заключалась в том, чтобы показать, насколько незначительным и постепенным является переход от нашего обыденного знания о пространстве и столе к самым высоким формам научного знания. Методология всегда одна и та же и состоит в формулировании ментальной конструкции, способной рациональным и простым образом координировать совокупность наших сенсорных впечатлений. У ребенка с его знанием пространства и стола эта координация настолько проста, что он достигает ее без заметных умственных усилий; тогда как в более сложных случаях научного знания синтез является результатом заумных математических спекуляций. Однако, помимо этой разницы в степени, существенных изменений нет.

А теперь давайте рассмотрим значение этих координаций и исследуем, что они нам раскрывают. Мы видели, что то, что мы называем реальностью, сводится к простейшей координации фактов наблюдения, и что эти факты, в конечном счете, представляют собой координации сенсорных впечатлений. Следовательно, мы можем сказать, что именно эти координации сенсорных впечатлений в нашем сознании дают нам знание о так называемой внешней вселенной. Эта научная интерпретация реальности может оскорбить тех, кто верит в существование более абсолютного типа реальности, реальности мира как такового. Конечно, для нас, людей, вполне естественно предполагать, что должен существовать какой-то реальный мир, представляющий собой реальность более конкретной категории, чем умственное построение, о котором мы говорили; мир, который существует в отсутствие всех человеческих наблюдателей и в котором зарождаются причины наших сенсорных впечатлений. Но какова природа этого реального мира вещей самих по себе, можно ли его описать человеческим языком, идентичен ли он представлению, которое мы о нем

сформировали, — все это, вероятно, бессмысленные вопросы, и в любом случае неразрешимые. Как только мы начинаем спорить по поводу этих проблем, каждый остается сам за себя; никто, похоже, не в состоянии убедить кого-либо другого. К счастью, дискуссии такого рода не представляют интереса для науки. Поэтому в этой главе слово «реальность» будет означать научную реальность, то есть простейшую координацию научных фактов и, следовательно, в конечном счете, сенсорных впечатлений. То, что столь ограниченное толкование реальности вполне удовлетворяет потребностям науки, вытекает из следующих соображений:

Сам факт того, что люди, обсуждая внешний мир, кажутся понимающими друг друга, является достаточным доказательством того, что они пришли к некоторому общему представлению о его природе. Следовательно, даже если мы предположим, что эта так называемая внешняя вселенная, которую каждый из нас считает открытой, представляет собой лишь индивидуальный сон, существующий только в наших умах, факт остается фактом: мы должны воспринимать этот сон как общий для всех людей. Как таковой, он проявляется во всех отношениях как объективная реальность, которую мы можем рассматривать как предсуществующую наблюдателю, который открывает ее по частям.

Из этого следует, что различие между идеализмом и реализмом в науке является чисто академическим, поскольку наши действия будут одинаковыми независимо от того, какую из двух противоположных философских концепций мы предпочитаем.^[135] Таким образом, физик, изучающий свойства материи, будет действовать точно так же, координируя свои результаты с максимальной простотой, независимо от того, верит ли он в материю как в метафизическую реальность или как в простое умственное построение. Таким образом, мы пришли к пониманию того, что понимается под объективным миром науки.

Теперь очевидно, что если бы было невозможно открыть или создать общий объективный мир, одинаковый для всех людей, из которого различные наблюдатели получали бы частные точки зрения, наука была бы совершенно невозможна; ведь наука имеет дело с общим, а не с частным или индивидуальным. Если бы объективный мир Джона не был также миром Питера, Джон и Питер никогда не согласились бы даже по самым элементарным вопросам. Обмен обычными знаниями и, в еще большей степени, научными знаниями был бы совершенно невозможен. Поэтому мы должны признать, что само существование науки доказывает, что координация ощущений Джона имеет ту же структуру, что и координация ощущений Питера. Это все, что мы можем сказать. Мы не имеем возможности узнать, не увидит ли один человек синий цвет там, где другой видит красный, если бы наши наблюдатели поменялись глазами и мозгами, сохранив при этом память о прошлых ощущениях. С другой стороны, мы можем утверждать на основании опыта, что для нормальных людей два объекта, которые кажутся одного наблюдателя одного цвета, будут казаться другого наблюдателя того же цвета.

Когда осознается важность для науки одного и того же общего объективного мира, становится очевидной необходимость избавиться от всех чисто индивидуалистических проявлений; и это приводит нас к проблеме иллюзий или галлюцинаций. Под иллюзорным объектом мы понимаем объект, который имеет только частное существование, но чье проявление можно объяснить с научной точки зрения с помощью других явлений, которым мы можем признать общее объективное существование. Так, в случае миража, если мы настаиваем на том, что перед нами в пустыне лежит вода, наш объективный мир будет отличаться от мира нашего друга, который, стоя там, где мы видим воду, будет утверждать, что воды нет. Несчастные последствия нашей ошибки могут быть очень серьезными, как в случае с собакой, которая уронила кость из-за ее отражения.

Следовательно, либо мы должны отказаться от веры в общую объективную вселенную и отказаться от всех попыток создать науку, либо мы должны успешно интерпретировать различия в наших мнениях, обращаясь к какому-либо явлению, такому как рефракция, которое все люди примут. В случае миража, например, введение рефракции спасает объективную вселенную, а значит, спасает науку. В конце концов, мы можем сказать, что яркая полоса в пустыне Ат- , является реальностью с точки зрения одного конкретного человека, но иллюзией с точки зрения общественности, тогда как рефракция является реальностью с точки зрения всех.

В случае галлюцинаций мы имеем дело с заблуждениями другого рода. Рассмотрим человека, пораженного лихорадкой, который видит вокруг себя змей. Конечно, змеи, как и вода в пустыне, не могут иметь места в общем объективном мире; так что в этом отношении галлюцинация и иллюзия кажутся аналогичными. Тем не менее, между ними существует важное различие. Так, в случае миража, все, что нам нужно было сделать, это встать в определенной точке, чтобы увидеть яркую полосу в пустыне так же легко, как и любой другой человек. Определенное сообщество в иллюзии все еще существовало бы. Галлюцинация, с другой стороны, по сути своей является частной. Мы не можем занять место пациента и страдать от его галлюцинации. На карту поставлено нечто более глубокое, чем просто изменение нашего места наблюдения в общем объективном мире.

Хотя физиологи и специалисты по изучению мозга могут успешно объяснить галлюцинацию с точки зрения объективных изменений в нашем организме (артериальное давление и т. д.), тем не менее мы имеем дело с проблемами, гораздо более сложными, чем те, которые исследуют современные физики. По всем этим причинам, в то время как цель физика — объяснить иллюзии с точки зрения общего объективного мира и законов физики, изучение галлюцинаций относится к другой области научных исследований. Во многих случаях установленное нами различие между галлюцинацией и иллюзией не является четким. Например, звезды, которые мы видим, когда нам ударяют по носу, не считаются результатом галлюцинации, и все же, согласно установленному выше разделению, это явление скорее относится к галлюцинации, чем к иллюзии. Аналогичные соображения применимы к сновидениям.

Существует более популярная интерпретация иллюзий. Она является результатом смешения невежества и иллюзии. Предположим, например, что мы получаем зрительные ощущения, которые заставляют нас утверждать, что перед нами стоит стол, но, подойдя к столу, мы обнаруживаем, что можем пройти сквозь него. Если бы мы, и только мы среди всех людей, могли видеть этот стол, то, исходя из прошлого опыта, мы были бы вправе предположить, что страдаем какой-то галлюцинацией, поскольку любая другая альтернатива лишила бы нас возможности представить себе объективный мир, одинаковый для всех людей. Но если бы все, кто вошел в комнату, видели тот же стол и, как и мы, не получали никаких тактильных ощущений от его присутствия, было бы слишком самонадеянно утверждать, что все мы стали жертвами заблуждения. Тайна могла бы быть разгадана без труда, если бы мы смогли объяснить это явление с помощью уже известных нам явлений; но если бы это не удалось, разумнее было бы согласиться с тем, что было открыто какое-то новое загадочное явление. В любом случае, было бы неправильно утверждать, что это явление обязательно является результатом коллективной иллюзии на том основании, что его реальность противоречит законам материи. Наши знания о законах природы получены только путем обобщения опыта; а там, где опыт неполный, как это всегда бывает, законы не могут претендовать на какую-либо степень определенности. Например, человек, ничего не знающий об атмосферном давлении, вполне может предположить, что воздушный шар никогда не сможет подняться в воздух, не вступив в

противоречие с законом гравитации, или что светлячок не может излучать свет, не сгорая. Причина, по которой теоретический ученый вынужден подходить к проблемам, кажущимся загадочными, с большой открытостью, заключается в том, что он уже столько раз сталкивался с открытиями, которые ничем не уступают по странности тому, о котором мы упомянули; а странность не обязательно является результатом иллюзии. Чаще всего она является результатом невежества и предрассудков. В этом отношении нам остается только представить себе удивление, которое мы испытали бы, если бы никогда не слышали об электромагните, обнаружив, что удаленные объекты летят к нему, не будучи притягиваемыми нитями.

А теперь вернёмся к нашему объективному миру. Мы предположим, что иллюзии из него исключены, и мир, который мы таким образом получили, можно представить как существующий одинаково для всех наблюдателей. Если мы предполагаем, что существует реальный мир вещей самих по себе, составляющий основополагающую причину нашего чувственного опыта, то мы хотим выяснить, может ли научный подход пролить свет на его природу.

Во-первых, обсуждая внешний мир как существующую реальность, мы должны различать его субстанцию и его структуру, или форму. Если, следуя науке, мы считаем, что наше знание о внешней вселенной может быть получено только путем рационального синтеза фактов опыта, мы должны признать, что субстанция полностью ускользает от нас; все, к чему мы можем приблизиться, — это структура, или отношения. Конечно, такой взгляд предполагает, что мы вправе утверждать, что знание можно приобрести только посредством рациональной координации. Если мы оспариваем правомерность этого утверждения, то весь аргумент рушится. Следовательно, научный аргумент не может опровергнуть взгляды мистика. Человек, который «знает» вещи через интуицию или веру, или человек, который говорит нам, что он знает, что в своей прошлой инкарнации он был Юлием Цезарем, является типом оппонента, с которым ученый даже не может спорить; ибо все, что не может быть ни доказано, ни опровергнуто наблюдением или разумом, представляет собой форму знания, которая бессмысленна или, по крайней мере, совершенно не имеет отношения к науке. Если бы мы не установили каких-то ограничений на то, что мы считаем знанием, не было бы никаких оснований предпочитать мнения Ньютона или Эйнштейна бредням невежды или сумасшедшего; и человеческое знание стало бы настолько противоречивым, что утратило бы всякое значение. Не отрицается, что интуиция часто может приводить к открытиям. Даже в математике есть множество примеров; но факт остается фактом: интуиция так часто вводила людей в заблуждение, что, если ее открытия не могут быть подвергнуты какому-либо испытанию, на них нельзя полагаться.

Кроме того, не утверждается, что интеллект – это все. Мы знаем, что у животных, и в еще большей степени у насекомых, инстинкт играет важную роль. Но, во-первых, следует отметить, что инстинкт практически не проявляется у людей. Во-вторых, у пчел, например, которые выбрали шестиугольную форму для своих сот, и этот выбор, как показывают математические вычисления, был лучшим из возможных, инстинкт привел к точно таким же результатам, как и интеллект; таким образом, за исключением отсутствия сознания, которое сопутствует инстинкту, в результатах, к которым он приводит, не обнаруживается никакой разницы. Следовательно, его вряд ли можно считать ным для получения новой формы знания. Если согласиться с этими утверждениями, мы можем вернуться к нашей теме и спросить, почему сущность полностью ускользает от нас, когда под «знанием» мы понимаем рациональную координацию фактов и сенсорных впечатлений.

Рациональные координации имеют свой наиболее совершенный прототип в математических координациях — например, в математической физике. Не все координации

могут быть построены математически; химия и, конечно, в еще большей степени биология, дают нам примеры, когда математика сравнительно бесполезна. Тем не менее, поскольку методы координации во всех случаях по сути одинаковы, математические координации, ввиду их большей ясности, можно с пользой изучать как типичные примеры в этом отношении.

Математические уравнения — это не что иное, как отношения, и из исходных отношений мы можем вывести только другие отношения. Другими словами, наши уравнения никогда не могут дать нам больше, чем мы изначально в них вложили. Отсюда следует, что если бы все отношения в природе сохранились, а вещества изменились, то никакой заметной разницы не было бы обнаружено; и мы никогда не смогли бы различить целый класс миров, идентичных по структуре, но различающихся по веществу. Если же мы отвергаем подход мистика или метафизика, утверждающего, что его знание не поддается экспериментальной проверке, мы должны признать, что вещество полностью ускользает от нас и что наше знание о реальном мире в лучшем случае сводится к скелету или структуре.

Иллюстрация, приведенная Эддингтоном, представляет ту же проблему в более конкретной форме. Он предполагает, что в каком-то будущем веке игра в шахматы может исчезнуть и быть забыта; и он сравнивает наше положение по отношению к реальному миру с положением археологов, которые обнаружат любопытные записи об игре, написанные обычным непонятным символизмом. В конце концов, им удастся восстановить ходы различных фигур, двумерное упорядочение разделителей и правила игры. В этой степени они могли бы утверждать, что поняли игру в шахматы. Однако некоторые аспекты остались бы для них совершенно непонятными. Форма разделителей, будь то квадратная, круглая или продолговатая, вид фигур, природа доски, будь то дерево или камень, остались бы неизвестными. Но следует отметить, что эти элементы знания, которые остались бы для них непонятными, были бы несущественными. Доска может быть деревянной или каменной, разделители могут быть ромбовидными или квадратными, и игра все равно будет проходить как и раньше. Если же, с другой стороны, изменится порядок расположения разделителей, если будут изменены допустимые ходы фигур, то письменные записи потеряют всякий смысл. То же самое происходит и в реальном мире. Сущность может измениться по своей природе, но никакой разницы не будет заметно; но если отношения изменятся, то перед нашим взором откроется новый мир. Поэтому в этой степени мы вправе сказать, что максимум, который могут раскрыть наши наблюдения, сводится к структуре реального мира. Как однажды сказал французский математик Бертран, возраст капитана « », количество членов экипажа, высота мачты не могут дать нам никакой информации о положении корабля.

Структура, как описано выше, сводится к тем математическим отношениям или уравнениям, которые, по-видимому, объясняют последовательность явлений. Но структура в более обычном смысле относится к самим скрытым механизмам, к глубоко укоренившимся, лежащим в основе причинам. Однако когда мы хотим получить более конкретное представление о структуре, мы сталкиваемся с рядом трудностей. Как указывает Пуанкаре, всякий раз, когда обнаруживается, что закон сохранения энергии и принцип наименьшего действия выполняются (как, например, в электромагнетизме), возможно бесконечное число различных механических моделей; таким образом, наше знание о структуре мира искажается тем фактом, что подструктура остается неопределенной. Клиффорд выражает ту же идею, когда говорит:

«Все, что можно объяснить движением жидкости, можно в равной степени объяснить либо притяжением частиц, либо деформацией твердого вещества; три различные гипотезы приводят к одинаковым математическим вычислениям; и наука, хотя и полностью

независимая от всех трех, может все же выбрать одну из них в качестве связующего звена между различными направлениями физических исследований».

В определенной степени трудности такого рода могут оказаться временными. Возможно, дальнейшие эксперименты позволят нам определить, какая из различных гипотез соответствует конкретной реальности. Такова была надежда ученых XVIII и начала XIX веков. И в наши дни практическая изоляция электронов и молекул является доказательством того, что эти надежды не всегда были беспочвенными. Однако даже в этом случае мы продвинулись бы лишь на один шаг и снова столкнулись бы с проблемой определения структуры этих электронов и так далее *до бесконечности*. Было бы бесполезно говорить, что наша цель была достигнута, когда были изолированы конечные составные элементы. Ибо либо эти предполагаемые конечные элементы не обладали бы никакой структурой, и в этом случае мы никогда не смогли бы узнать о них ничего больше, либо они обладали бы структурой, но тогда они не составляли бы конечных элементов, поскольку эта структура подразумевала бы отношения между их различными частями, и мы не достигли бы конца нашего пути.

С открытиями современной науки на пути к успеху возникают еще другие трудности. Теперь кажется, что по мере нашего продвижения в микроскопический мир точные законы могут исчезнуть. Если это так, то микроскопические структуры всегда будут ускользать от нас. Однако даже если мы отбросим эти последние трудности, становится очевидным, что научный метод не может дать нам знания о сущности; мы можем приблизиться только к структуре реальности.

Но эта реальность, опять же, является не чем иным, как выражением простейшей координации научных фактов; она не подразумевает никакой подлинной метафизической реальности. Если мы отбросим критерий простоты, мы сможем представить наш мир столькими различными способами, сколькими нам заблагорассудится. Рассмотрим, например, теорию Эйнштейна. Одним из главных открытий этой теории было раскрытие неожиданных взаимосвязей между пространством и временем, что привело к четырехмерной пространственно-временной структуре Вселенной. И все же, если бы мы захотели, мы могли бы объяснить все предсказания Эйнштейна, сохранив при этом наше традиционное представление о трехмерной структуре пространства и несвязанном с ним времени. Таким образом, эксперимент Майкельсона можно было бы объяснить гипотезой Ритца или Стокса; эксперимент Бухерера — увлечением определенной массы эфира движущимся электроном, подобно тому, как корабль увлекает за собой часть окружающей его воды; эксперимент Физо — модификацией эфира в прозрачных телах (и это, по сути, было первоначальным объяснением Френеля). Двойное преломление луча света и движение Меркурия можно было бы объяснить модификацией закона всемирного тяготения Ньютона; эффект сдвига Эйнштейна — модификацией внутриатомной структуры солнечного атома и т. д. Рассматривать различные гипотезы, которые можно было бы предложить, — чистая трата времени, поскольку мы можем придумать столько разных гипотез, сколько захотим. Само собой разумеется, что вся простая красота и единство природы, раскрытые теорией Эйнштейна, будут утрачены; и предвидение будет невозможно, поскольку на всех последующих этапах потребуются новые *адох* постулаты. Но в конце концов, какое отношение имеют простота, красота, единство и предвидение к реальности метафизика?

Таким образом, реальность структуры, которую защищает метафизик (не говоря уже о реальности субстанции), предполагает его *априорную* веру в неизбежную простоту природы. Но простота, в конце концов, является лишь выражением человеческого восприятия. Более того, даже если бы эта точка зрения была оспорена, не было бы никаких оснований

предполагать, что природа должна предпочитать простоту сложности. На самом деле, то немногое, что мы знаем о природе, доказывает, что верно обратное, когда мы перестаем рассматривать явления приблизительно макроскопическим образом и принимаем более микроскопическую точку зрения. Для иллюстрации: в физике нет более простого закона, чем закон идеальных газов; и все же мы знаем, что эта кажущаяся простота обусловлена нашими макроскопическими наблюдениями и скрывает за собой самый ошеломляющий хаос и неопределенность. То же самое происходит, когда мы рассматриваем множество других явлений, таких как внутриатомные изменения.

Из этого следует, что отождествлять реальность с простотой координации — по крайней мере, сомнительная процедура. А если мы отбросим это условное отождествление, реальность (даже реальность структуры) полностью ускользает от нас. Конечно, тип реальности, который мы называем неуловимым, — это абсолютная реальность, «истинное бытие» метафизика. Ученый также обращается к слову «реальность», но использует его в другом смысле. Для него реальность отождествляется с простотой координации, и он четко излагает свои взгляды, прекрасно понимая, что реальность этого типа далека от абсолютной и по сути своей прагматична. Именно по таким причинам подавляющее большинство ученых в душе являются агностиками (), не из-за каких-либо *априорных* предпочтений, а потому, что правильное понимание ограниченности научного знания не оставляет им другого выбора, поскольку они отказываются признавать знание мистика или метафизика как имеющее какое-либо значение. Но научный агностицизм не следует путать с той крайней формой идеализма, которая отрицает существование какого-либо мира, кроме сознания. Он просто довольствуется утверждением, что объективный мир науки (мир пространства, времени, материи, движения в классической науке и пространства-времени, интервалов и тензоров в теории относительности) является не чем иным, как воплощением простейшей координации сенсорных впечатлений, за которые, как предполагается, отвечает какой-то непознаваемый сверхразумный мир.

Следовательно, если бы наш разум работал иначе, не было бы оснований утверждать, что мы должны формировать одно и то же представление о мире. Мы не знаем, если бы марсианин ступил на Землю, сформировал бы его разум такое же ментальное представление о Вселенной, как и наш. Для марсианина, возможно, не существует таких вещей, как пространство, время и материя. Тем не менее, он мог бы сформировать представление о Вселенной, которое было бы для него совершенно понятным. Те, кто верит в метафизическую реальность пространства и времени, существующих в мире вещей самих по себе, под предлогом того, что мы можем представить себе существование только в пространстве и времени, по-видимому, виновны в той же ошибке, что и те, кто, никогда не слыша о рыбах, утверждают, что такие существа не могут существовать, поскольку они не способны дышать. Антропоморфные аргументы такого рода не имеют места в науке.

Короче говоря, не отрицается, что может существовать мир вещей самих по себе; утверждается лишь то, что мир такого рода не поддается никакому описанию. Несколько цитат из трудов ведущих ученых проясняют эту позицию. Так, в книге Лармора «Эфир и материя» мы находим: «Законы материи, в конце концов, являются лишь законами разума». И снова у Пуанкаре мы читаем: «Являются ли законы природы, если рассматривать их как существующие вне разума, который их создает или наблюдает, внутренне неизменными? Этот вопрос не только неразрешим, но и бессмыслен. Какой смысл задаваться вопросом, могут ли законы меняться со временем в мире вещей самих по себе, если в мире такого типа время может не иметь никакого значения? Об этом мире вещей самих по себе мы ничего не можем сказать; мы даже не можем о нем думать. Все, что мы можем обсуждать, — это то, как он будет выглядеть для разумов, подобных нашим». И еще в другом месте: «В мире Бергсона

нет законов. Мир, в котором могут существовать законы, — это лишь более или менее деформированное представление, которое ученые создали о нем». Нет необходимости приводить дальнейшие цитаты, поскольку с небольшими вариациями ту же философию выражают все ученые.

Однако нельзя не подчеркнуть, что с практической точки зрения эти вопросы представляют чисто академический интерес. Физики и математики-физики вынуждены действовать и рассуждать так, как будто они верят в реальное существование реальной абсолютной объективной вселенной, вселенной пространства и времени, согласно классической науке, вселенной пространства-времени, согласно теории относительности. Фактически, как мы уже сказали, если бы было невозможно представить себе общий объективный мир, существующий независимо от наблюдателя, который открывает его по частям, физическая наука была бы невозможна.

Кстати, можно напомнить, что такие проблемы, как относительность или абсолютность пространства и движения, не имеют ничего общего с идеализмом и реализмом. Пространство может быть субъективным, но абсолютным, или реальным, но относительным. Важно не путать значение слов «абсолютный» и «относительный», используемых физиками, с их значением, понимаемым философами. Большая часть трудностей, с которыми, по-видимому, столкнулись философы в понимании позиции науки, возникла из-за подобных путаниц.

Теперь, если мы вернемся к тому рациональному синтезу наших сенсорных впечатлений, который дает нам объективный мир науки, остается обсудить методологию, с помощью которой достигается этот синтез. В более простых случаях эта процедура представляет собой обычное логическое и индуктивное мышление, но в более сложных случаях этот процесс является исключительно математическим. Существует близкое сходство между процедурой развития, которой следует чистая математика, и процедурой теоретической физики. В обоих случаях тенденция заключалась в поиске единства через прогрессивное обобщение.

Математика, конечно, настолько обширная дисциплина, что невозможно раскрыть даже ее характерные аспекты на нескольких страницах; но для наших целей мы упомянем ее обобщающий аспект. Математика занимается общими вопросами. Она стремится получить общие законы и общие теории в противоположность частным результатам. Например, сумма первых двух нечетных чисел равна квадрату числа 2; сумма первых трех нечетных чисел равна квадрату числа 3. Однако это не говорит нам, какова будет сумма первых 10 000 нечетных чисел. Мы могли бы приступить к сложению этих чисел и выяснить результат, но цель математики состоит в том, чтобы избежать такого трудоемкого занятия. Она достигает этой цели, демонстрируя существование математического закона, согласно которому сумма первых n нечетных чисел равна n^2 , каким бы большим ни было n . Когда установлен общий закон такого рода, мы можем применить его формулу к любому конкретному случаю и таким образом без лишних хлопот получить решение.

Процедура, с помощью которой получается этот закон, называется *математической индукцией*. Мы проверяем, что сумма первых двух нечетных чисел равна 2^2 ; затем доказываем, что в этом случае сумма первых трех нечетных чисел обязательно равна 3^2 . Наконец, мы доказываем, что *если* сумма первых $(n - 1)$ нечетных чисел равна $(n - 1)^2$, то сумма первых n нечетных чисел обязательно равна n^2 . Мы предполагаем, что этот закон будет действовать независимо от того, насколько велико n , или, другими словами, он всегда должен действовать; и наш математический закон установлен. Короче говоря, математика стремится дать нам общие законы вместо частных фактов, или, опять же, перейти от

частного к общему. Поиск общности и единства составляет *лейтмотив* математики. [\[136\]](#) Несколько конкретных примеров могут прояснить этот момент.

Предположим, что мы исходим из естественной последовательности целых чисел и работаем под впечатлением, что только эти целые числа составляют истинные числа. Мы должны заметить, что если мы разделим одно из наших чисел, скажем, число 10, на число 5, то получим одно из наших целых чисел, а именно 2. С другой стороны, если мы разделим 10 на 4, то результат не даст одно из наших целых чисел. Соответственно, мы вынуждены будем заявить, что деление одного числа на другое может дать истинное число, а может и не дать. Чтобы восстановить общее правило, математики были вынуждены предположить существование дробных чисел, столь же, столь же реальных или истинных, как и целые числа. Благодаря этому введению стало возможным утверждать, что деление одного числа на другое всегда дает истинное число. Теперь предположим, что мы попытались извлечь квадратные корни. Мы обнаружим, что в то время как квадратные корни некоторых из наших истинных чисел сами по себе являются истинными числами (т. е. $\sqrt{4} = 2$), в большинстве случаев мы не получим такого результата (т. е. $\sqrt{2}$). Следовательно, мы должны сказать, что в некоторых случаях квадратный корень истинного числа будет истинным числом, а в других случаях он будет соответствовать бессмыслице. Опять же, для получения общего случая нам пришлось бы включить эти, казалось бы, бессмысленные величины вместе с истинными числами, получив тем самым так называемые иррациональные числа. Аналогичным образом, отрицательные числа пришлось бы ввести, чтобы придать смысл во всех случаях вычитанию одного истинного числа из другого. Мнимые числа появились бы, если бы мы захотели обобщить значение квадратного корня числа, будь то положительного или отрицательного; затем появились бы комплексные числа, если бы мы захотели придать обобщенность значению сложения чисел, будь то действительных или мнимых. Дальнейшее обобщение привело бы к появлению кватернионов и гиперкомплексных чисел в целом. Следуя еще одной линии обобщения, Кантор ввел в математику трансфинитные числа.

Еще один пример можно найти в геометрии. Так, если на плоскости мы начертим прямую линию и кривую второго порядка (окружность, эллипс, параболу или гиперболу), может случиться, что линия пересекает кривую в двух точках, но может случиться и так, что пересечения не произойдет. Однако обобщенность может быть восстановлена, если мы введем мнимые точки и будем рассматривать их как истинные точки. С помощью этого расширенного понятия точки мы можем сказать, что прямая линия *всегда* пересекает кривую второго порядка в двух истинных точках, будь то реальных или мнимых. Дальнейшие обобщения требуют введения *идеальных точек, точек в бесконечности, мнимых линий и углов*.

Кроме того, когда мы рассматриваем кривую второго порядка, необходимо указать положения пяти ее точек, чтобы кривая была определена однозначно. Но круг также является кривой второго порядка; однако в случае круга, когда мы указываем положения трех его точек, круг полностью определен. Следовательно, наше правило не является общим и не может считаться верным для всех кривых второго порядка, будь то эллипсы, параболы, гиперболы или окружности. Однако, когда вводятся мнимые точки, эта двойственность исчезает, и наше правило становится общим. Оказалось, что все окружности без исключения проходят через две одинаковые мнимые точки, называемые *круговыми точками в бесконечности*. Если мы принимаем во внимание эти две мнимые точки, то можем утверждать, что *все* кривые второго порядка, будь то окружности, эллипсы и т. д., определяются, когда заданы пять их точек. Интересно также отметить, как показали Кэли и Клейн, что при введении мнимых точек, прямых и углов различные геометрии

(неевклидова и евклидова) могут рассматриваться с точки зрения проективной геометрии. Мы видим, что во всех случаях математики пытаются заменить слово «иногда» словом «всегда», частное — общим, тем самым раскрывая единство там, где раньше царило разнообразие.

Приведем еще один геометрический пример. Всегда можно начертить треугольник, описанный по окружности, то есть такой, три стороны которого касаются окружности. Также всегда можно вписать треугольник в окружность, что означает, что три вершины лежат на окружности. Теперь, Эйлер заметил, что если начертить две окружности наугад, то в большинстве случаев невозможно начертить треугольник, который был бы вписан в одну окружность и описан другой. Однако, когда удавалось найти один такой треугольник, можно было начертить и бесконечное количество других.

Понселе дал знаменитое обобщение этой теоремы, а Якоби показал ее тесную связь с эллиптическими функциями. Мы можем понять суть этого обобщения следующим образом:

Окружность является частным случаем конической секции, а треугольник — частным случаем многоугольника; отсюда Понселе расширил теорему Эйлера, которая касается окружностей и треугольников, до теоремы, касающейся конических секций и многоугольников. В этой иллюстрации мы снова наблюдаем ту же тенденцию — прогресс в направлении обобщения.

Возможно, самые красивые примеры можно найти в теории функций. Математические функции — это величины, значения которых изменяются в зависимости от значения переменной, которую они содержат. Мы можем построить столько различных типов функций, сколько захотим, добавляя дополнительные члены, и построенные таким образом функции отличаются друг от друга по своему поведению.

$$y = a + bx$$

Например, если мы назовем y значением функции и обозначим переменную как x , то

является математической функцией (a и b являются заданными константами). Каждому значению x соответствует определенное значение y . Более сложная функция будет задана выражением

$$y = a + bx + cx^2.$$

Вскоре было обнаружено, что, если вместо добавления к выражению нашей функции просто большого числа последовательных членов мы добавляем бесконечное число членов, выбранных соответствующим образом, мы часто получаем функции, обладающие чрезвычайно простыми свойствами; настолько простыми, что для них можно придумать отдельные названия. Эти различные функции можно сравнить с разными существами, обладающими различными особенностями и склонностями. Некоторые математики (например, Борель) зашли так далеко, что стали различать здоровые функции и зараженные, и в математику было введено название «патология функций». В качестве примера самого простого типа функций можно упомянуть функции, заданные бесконечной серией

$$\begin{aligned}
& x - \frac{x^3}{1!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \text{etc.} \\
& 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \text{etc.} \\
& 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \text{etc.}
\end{aligned}$$

где $3!$ обозначает $1 \times 2 \times 3$, and $n!$ для $1 \times 2 \times 3 \times \dots \times n$. Эти функции были известны, соответственно, как «синус x » (или $\sin x$), «косинус x » (или $\cos x$) и экспоненциальная функция e^x .

Затем было обнаружено, что функции $\sin x$ и $\cos x$ имели очень жесткие взаимосвязи, как будто они принадлежали к одной семье. Эта семья получила название «циклические

$$\sin x = \sqrt{1 - \cos^2 x}.$$

функции»; рассматриваемая нами взаимосвязь задается формулой

С другой стороны, между этими круговыми функциями и экспоненциальной функцией e^x таких отношений, по-видимому, не существовало. Но весь аспект проблемы изменился, когда Эйлер обратился к мнимым величинам, таким как ix ; где i означает $\sqrt{-1}$, а x означает любое действительное число, как и раньше. Конечно, мнимое число, как следует из его названия, было задумано его изобретателями как нереальная величина, просто математическая фикция, имеющая только символическое значение. И все же, как мы увидим, без мнимых чисел некоторые из наиболее практических промышленных задач никогда не могли бы быть решены.

Как мы уже сказали, Эйлер заменил действительные числа мнимыми в функциях, которые мы обсуждали, и обнаружил, что при этом между этими ранее не связанными между собой функциями существует удивительная связь. Эта связь была выражена

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x.$$

формулой

В этой формуле нам нужно только сделать $x = 2\pi$, и мы получим

$$e^{2\pi i} = 1.$$

Таким образом, введение мнимых чисел не только выявило неожиданную связь между совершенно разными типами функций, но и показало, что два числа π и e , взятые из совершенно разных областей математики, из геометрии и логарифмов, внезапно проявили необычайную взаимосвязь.

Но введение мнимых чисел в математический анализ вскоре привело к еще более удивительным открытиям. Коши предпринял общее исследование функций, в которых переменная была бы комплексным числом, то есть действительным числом плюс мнимым.

Таким образом, он открыл новую вселенную функций, называемых функциями комплексной переменной, обладающих самыми странными свойствами; и оказалось, что наши старые функции были лишь частными случаями этих более общих типов. Но для того, чтобы эти новые функции обладали существенными атрибутами наших старых функций, на них необходимо было наложить определенные математические ограничения. Оказалось, что эти ограничения выражаются тем же математическим соотношением, которое определяет распределение потенциала в законе всемирного тяготения Ньютона, а именно уравнением Лапласа.^[137] Это уравнение вновь появляется в теории конформного представления, в теории тепла, в теории упругости и т. д. Таким образом, неожиданные соотношения, по-видимому, возникают повсюду. Между прочим, можно отметить, что великие открытия Римана в теории функций берут свое начало в этой аналогии, существующей между функциями комплексной переменной и законами распределения потенциала вокруг материи.

Теория функций комплексной переменной составляет одну из самых обширных областей чистой математики, с которой связаны имена некоторых из величайших математиков, таких как Коши, Риман, Вейерштрасс, Якоби, Абель, Эрмит и Пуанкаре. Многие проблемы, связанные с обычными функциями, находят очень быстрое решение, если рассматривать эти функции как частные случаи более общих функций комплексной переменной. Со временем был открыт ряд таких функций, обладающих странными, но простыми свойствами, всегда с помощью того же процесса последовательного обобщения. Сначала были открыты *эллиптические функции* Абеля и Якоби, затем модулярные функции Эрмита и, наконец, *автоморфные функции* Пуанкаре. Вновь открытие этих новых функций выявило неожиданные связи между областями математики, которые казались совершенно чуждыми друг другу; Пуанкаре установил удивительные связи между автоморфными функциями, некоторыми проблемами теории чисел и неевклидовой геометрией.

Кстати, распространенное мнение о том, что математики, обращаясь к мнимым величинам и тому подобному, покидают мир реальности и погружаются в мир теней, опровергается тем фактом, что одна из самых элементарных механических задач, а именно колебательное движение обычного маятника, может быть решена математически только с помощью эллиптических функций, несмотря на то, что мнимые величины являются неотъемлемой частью их структуры.^[138] То же самое касается ряда электрических задач, имеющих широкое промышленное значение; аналогично, согласно закону гравитации Эйнштейна, орбиты планет не могут быть рассчитаны без использования эллиптических функций. Аналогичные соображения применимы к автоморфным функциям Пуанкаре. Однако, признавая этот момент, конечно же, очевидно, что математик в первую очередь не заинтересован в том, чтобы узнать, имеют ли его абстрактные спекуляции какое-либо соответствие в реальном объективном мире, так же как поэт не желает знать, сбудутся ли его мечты. Единственной целью его исследований является изучение всех рациональных возможностей и координация в одно целостное целое различных математических построений, которые на первый взгляд могут показаться совершенно чуждыми друг другу.

Мы особо подчеркнули эту обобщающую тенденцию математики, поскольку именно она будет играть важную роль, когда мы рассмотрим методологию математической физики, примененную к миру реальности. Здесь мы должны напомнить, что, каким бы загадочным это ни казалось, природа, по-видимому, поддается математическому исследованию и подчиняется строгим математическим законам, по крайней мере, в первом приближении. Что касается ученых, то эта вера не является результатом религиозных или философских предпосылок. Скорее, это убеждение, навязанное нашим умам триумфами теоретической физики, первым великим примером которой стала небесная механика Ньютона. Как только

эта подверженность законам была признана в природе, заявленной целью науки стало открытие неизвестных законов, что позволило бы нам предвидеть и предсказывать, а значит, и предотвращать, и перестать жить в мире неожиданных чудес. В тех областях, где законы были окончательно установлены, наука вытеснила суеверие; а там, где по той или иной причине законы найти не удалось, суеверие продолжало царить. Типичным примером является метеорология, которая, несмотря на недавние успехи, остается чрезвычайно отсталой наукой. В результате астроном, который никогда не подумал бы молиться о солнечном затмении, все же может молиться о безоблачном дне, благоприятном для его наблюдений.

Теперь, чтобы сделать природу поддающейся математическому описанию, необходимо, чтобы нам удалось свести различные природные явления к общим терминам. Это достигается путем поиска количественных различий под качественными различиями. Только когда это количественное сведение будет достигнуто, наука сможет продолжить свои исследования, свои дедукции и индукции. В случае объективной вселенной физики этот процесс сведения качества к количеству приводит нас к представлению об объективной вселенной как о вселенной электромагнитных колебаний и молекул, атомов и электронов, взаимодействующих друг с другом в соответствии с фиксированными законами, мчащихся туда-сюда в пространстве или колеблющихся вокруг фиксированных точек. Таким образом, объективная вселенная науки бесшумна, безсветова и без запаха. Все качества и ценности воспринимаются как возникающие из взаимодействий, существующих между нашими органами чувств и движениями внешнего мира, точно так же, как удар тела проявился бы в виде звука для гонга, наделенного сознанием.

Однако это количественное сокращение является лишь первым шагом; и даже после его осуществления природа все еще может сопротивляться математическому исследованию. Дело в том, что математика состоит в объединении подобного с подобным; широкие разнородности даже среди количеств сделали бы обращение к человеческой математике бесполезным. Таким образом, игра в шахматы, где различные фигуры могут двигаться самыми разными способами, не поддается математическому анализу. Тот факт, что теоретическая наука возможна, доказывает, что в природе можно найти сходство и единство.

С другой стороны, природа должна быть простой, или, по крайней мере, простой в первом приближении. Теоретически простота не может существовать в природе, поскольку целое влияет на часть, а часть влияет на целое. Но в некоторых случаях было признано допустимым игнорировать ряд влияний из-за их незначительности, и таким образом наука смогла прогресс. Именно потому, что в метеорологии это ограничение активных влияний до минимума кажется невозможным, долгосрочные прогнозы погоды остаются догадками любого человека.

Но есть еще одно условие, которое должно быть найдено в природе, и это непрерывность. Математика способна решать проблемы, в которых присутствуют разрывы, но технические трудности очень велики; и это главная причина, по которой теория чисел представляет такие препятствия. С другой стороны, когда мы имеем дело с проблемами непрерывности, математик чувствует себя более комфортно; и тогда становится применимым тот великолепный математический инструмент, который известен как дифференциальное уравнение. Кстати, мы можем понять, почему открытие Планком квантовых явлений, или прерывистых скачков в природных процессах, было такой неприятной новостью для теоретических физиков: дифференциальное уравнение утратило свою силу.

Даже сейчас мы не избавились от трудностей. Предполагая, что природа проявляет единство, простоту и непрерывность, мы можем исследовать ее секреты только при условии, что перед нами стоят математические проблемы, которые мы можем решить. Даже такие относительно простые проблемы, как движение четырех тел, притягивающих друг друга по закону Ньютона, до сих пор не поддавались никаким попыткам. Опять же, наши дифференциальные уравнения очень просты. Они подходят только для самых простых задач, когда, например, будущее положение тела, движущегося под действием заданной силы, зависит исключительно от его положения в начальной точке. Но что, если будущее положение тела зависит от всей его прошлой истории? Явления такого типа, подверженные наследственному влиянию, хорошо известны в физике и иллюстрируются гистерезисом, или усталостью, металлов; и, конечно, в биологии они являются правилом. Сегодня такие задачи можно решать, по крайней мере в самых элементарных случаях, следуя открытиям Вольтерры в области интегро-дифференциальных уравнений. Это открывает новую область науки, известную как «наследственная математика» ().

Когда мы рассматриваем все эти технические трудности и осознаем, что решения этих проблем были получены только благодаря самым абстрактным спекуляциям чистых математиков, изобретению или открытию математических сущностей, которые на первый взгляд кажутся совершенно чуждыми миру реальности, мы не должны преуменьшать практическую важность этих, казалось бы, нереальных сущностей.

На самом деле, учитывая незначительность наших математических способностей, то, что теоретическая физика вообще стала возможной, можно считать чудом. Если бы в нашей солнечной системе было два солнца, как в двойных звездных системах, или если бы одна из планет была сопоставима по размеру с солнцем, можно с уверенностью сказать, что Ньютон, несмотря на свой гений, никогда бы не открыл свой закон всемирного тяготения, поскольку он столкнулся бы с огромной проблемой трех тел.

Оставляя в стороне эти технические трудности, остается факт, что в ряде случаев математика оказалась применима к природе, по крайней мере, приблизительно, и в результате были открыты математические законы. Теперь мы покажем, как развивались эти теории математической физики. Для начала экспериментатор обнаруживает большое количество эмпирических фактов. Затем эти факты координируются в единое целое, устанавливаются общие отношения или законы, и таким образом мы получаем различные группы явлений, такие как электричество, магнетизм, оптика, механика, химия, биология и т. д. В некоторых случаях может быть невозможно выйти за пределы начальной стадии; несмотря на накопление экспериментальных данных, координация фактов и открытие общих отношений и законов могут оказаться не поддающимися анализу. В таких случаях мы едва ли можем считать наши знания наукой.

Следующая задача состоит в том, чтобы скоординировать и установить связи между этими различными областями науки. Ограничиваясь физикой, мы видим, что сначала были обнаружены связи между электрическими и магнитными явлениями, затем между распространением света и колебаниями упругих твердых тел (Френель, Маккаллах), затем между электромагнитными и оптическими явлениями (Максвелл), затем между теплом и молекулярным движением (Максвелл, Больцман). Но, несмотря на эти высокие синтезы, одно таинственное влияние, казалось, оставалось чуждым всем остальным; это было гравитация. Одним из триумфов теории относительности стало установление связи между гравитацией и оптикой или электричеством.

Наконец, объединение всех этих различных областей ищется в выражении гигантского универсального закона, принципа действия, управляющего единственной математической

функцией мира, функцией действия вселенной, что, по-видимому, предполагают теории Вейля и Эддингтона.

Короче говоря, мы видим, что развитие теоретической физики следовало за развитием чистой математики в ее обобщающих характеристиках. В обоих случаях руководящим мотивом было разрушение барьеров, открытие единства в разнообразии. И все же, несмотря на эту математизацию физики, продемонстрированную в работах теоретических физиков, физика не является математикой, а истина в физике не то же самое, что истина в математике.

Во-первых, физика развивается путем последовательных приближений и не достигает своей цели одним махом, как это часто бывает в математике. Так, во времена Галилео было бы правильным сказать: центр тяжести снаряда, движущегося *в вакууме*, описывает параболу. Полвека спустя Ньютон признал, что это утверждение было лишь приблизительным. Правильным утверждением стало: в идеальных условиях изоляции центр тяжести снаряда описывает эллипс, центр Земли находится в одной из его фокусов. Но, согласно теории относительности, утверждение Ньютона, в свою очередь, является приблизительным. Теперь мы должны сказать, что траектория лежит по эллипсу, ось которого медленно вращается. Есть все основания полагать, что даже механика Эйнштейна является лишь приближением к истине, а волновая механика Шредингера уже вытесняет ее в бесконечно малых масштабах. Действительно, есть все основания полагать, что как бы далеко мы ни зашли, мы всегда будем иметь дело с приближениями. Здесь, таким образом, заключается существенное различие между физикой и математикой. До сих пор казалось, что абсолютная истина может существовать, но наши нынешние средства исследования не позволяют нам ее достичь. Но мы увидим, что на карту поставлено нечто большее, чем временное признание неудачи.

Рассмотрим, например, физические константы, такие как R (газовая постоянная) или h (постоянная Планка), и сравним их с математическими константами, такими как π (математическая постоянная) или e (математическая постоянная). В то время как математические константы можно вычислить с любой степенью приближения, значения, которые мы присваиваем физическим константам, никогда не могут считаться абсолютно точными. Это не только потому, что физические наблюдения неизбежно неточны или потому, что условия наблюдения могут быть не идеальными из-за наличия случайных влияний; здесь задействованы и другие, более глубокие причины. Дело в том, что мы ни в коем случае не можем быть уверены в том, что природа подчиняется строгим математическим законам и что так называемые константы физики представляют собой нечто иное, чем средние значения. Триумфы теоретических физиков позволяют предположить, что математизация физики допустима в качестве первого приближения; однако более тщательное микроскопическое исследование может доказать, что эта видимая математическая чистота и простота природы обусловлена нашим грубым макроскопическим исследованием явлений. Например, хорошо известно, что если условия достаточно хаотичны, хаос будет порождать простоту, когда мы смотрим на вещи с макроскопической точки зрения; только когда мы хотим посмотреть на вещи микроскопически, появляется хаос и математические методы становятся невозможными.

Как мы уже упоминали ранее в этой главе, кинетическая теория газов дает нам подходящую иллюстрацию. Молекулы мчатся туда-сюда, отскакивая друг от друга самым капризным образом. ^[139] Было бы совершенно невозможно предсказать историю данной

молекулы; и все же, благодаря этому самому хаосу, макроскопические законы идеальных газов чрезвычайно просты. Следовательно, мы можем сделать вывод, что константы физики, которые входят в наши макроскопические законы, представляют собой лишь средние эффекты и существенно отличаются от констант чистой математики. В более общем плане, даже в идеальных условиях наблюдения мир физики никогда не может быть приравнен к миру чистой математики.

Упрощение, которое следует из макроскопического исследования природы, позволяет нам понять причину тех периодических колебаний, которые происходят в теоретической науке между физикой общих принципов и атомистической точкой зрения. Если мы рассматриваем природу атомистически, то мы будем стремиться интерпретировать явления с точки зрения притяжения и отталкивания между молекулами, атомами или электронами. После успеха Ньютона в описании движения планет ученые XVIII и начала XIX века стремились продолжить этот метод, сводя весь мир физической науки к притяжению и отталкиванию между дискретными частицами. Привлекались всевозможные законы: законы обратно пропорциональные кубу и законы, включающие еще более высокие степени. Но природа оказалась не такой простой, как надеялись ученые, и они уделяли очень мало внимания трудностям математического анализа. Так возникла противоположная школа ученых, которые заменили атомистические теории своих предшественников общими принципами, воплощающими более широкие концепции, такие как энергия, энтропия, действие.

Аргументы этой новой школы мысли были примерно следующими: «Сосредотачиваясь все больше и больше на вашем мире атомов и молекул, вы теряете из виду те общие принципы, которые были выявлены экспериментально. Не лучше ли поэтому отказаться от ваших безнадежно сложных спекуляций и принять в качестве отправной точки эти фундаментальные принципы, которые можно вывести из макроскопических исследований? Мы признаем, что, поступая так, вы замените микроскопический взгляд на природу макроскопическим, но из-за математических трудностей, в которые вы попали, и многочисленных гипотез, которые вам пришлось выдвинуть, чтобы компенсировать свое незнание микроскопических механизмов, возможно, будет безопаснее довольствоваться, по крайней мере на данный момент, макроскопической точкой зрения».

Мы можем проиллюстрировать новую точку зрения примерно следующим образом: компания по страхованию жизни не знает и не имеет возможности предсказать, когда умрет один из ее клиентов; однако, если вместо рассмотрения случая отдельного клиента (что соответствовало бы микроскопической или атомистической точке зрения) мы рассмотрим людей в целом (макроскопическая точка зрения), можно установить определенные общие статистические данные о смертности. Придавая слишком большое значение одному индивидууму, мы упустим из виду этот общий принцип, и страховые взносы никогда не смогут быть установлены. Аналогия далеко не идеальна, но она полезна тем, что показывает нам, что, по крайней мере, в некоторых случаях макроскопическая точка зрения может дать нам необходимую информацию. Лучшая иллюстрация приведена в следующем очень вольном переводе отрывка из Пойнкарэ. Как он говорит:

«Предположим, что перед нами находится какая-то машина. Видны только первичные и конечные шестерни, а промежуточные системы передачи скрыты. Мы не имеем возможности узнать, передается ли движение с помощью шестерен или ремней, с помощью поршней или другими способами. Означает ли это, что мы никогда не сможем понять, как устроена машина, если не разберем ее на части? Мы знаем, что это не так, потому что принцип сохранения энергии позволяет нам определить самое важное. Мы наблюдаем, например, что последнее колесо вращается в десять раз медленнее первого, причем оба эти

колеса видны. Из этого мы можем сделать вывод, что если к первому колесу приложить момент силы, то он уравновесит в десять раз больший момент силы, приложенный к последнему колесу. Эта информация получена без необходимости рассматривать механизм, с помощью которого достигается это состояние равновесия, и без необходимости знать, как различные силы уравнивают друг друга внутри машины. Когда мы рассматриваем Вселенную, применимы аналогичные аргументы. Большая часть ее работы находится за пределами сферы наблюдения, но, наблюдая за теми движениями, которые мы можем воспринимать, мы можем, благодаря принципу сохранения энергии, сделать выводы, которые останутся верными независимо от структурных деталей тех частей, которые невидимы».

Таким образом, наука склонялась к тому, чтобы потерять интерес к микроскопическим механизмам и сосредоточиться на общих принципах. Однако вскоре произошло возвращение к атомистическому подходу, но на этот раз наши знания были более продвинутыми, и в результате был достигнут больший успех. Мы являемся свидетелями этого возвращения к атомистическому подходу в теории Лоренца об электронной структуре материи и электричества. Эта эпохальная теория привела к потрясающим прогнозам, и казалось, что был сделан большой шаг вперед. Но вновь возникли трудности, и здесь мы имеем в виду те загадочные явления, которые были исходной точкой теории относительности.

Эйнштейн снова возвращается к общим принципам. Вместо того, чтобы пытаться объяснить загадочные отрицательные эксперименты, приписывая электронам и материи всевозможные странные свойства, он принимает эти отрицательные эксперименты как свидетельство некоторого общего принципа, а именно относительности галилеева движения через эфир, влекущего за собой неизменность скорости света.

Недавние теории о природе атома предоставляют примеры подобного рода. Так, теория атома Бора имеет атомистические тенденции в том, что она приписывает определенные траектории и движения электронам, движущимся вокруг ядра. Таким образом, она смогла приписать гелию определенные спектральные линии, которые до этого приписывались водороду. Точные эксперименты с тех пор подтвердили правильность предсказаний Бора. Однако вскоре возникли непреодолимые трудности, когда были предприняты попытки распространить теорию на более тяжелые атомы. Были введены полуквантовые числа и вращающиеся электроны, что значительно усложнило теорию.

Поэтому Борн и Гейзенберг отказались от атомистической точки зрения, подчеркнув необходимость следовать строго феноменологическому подходу. Движения и орбиты электронов были полностью игнорированы, поскольку они никогда не наблюдались, и учитывались только распределение, поляризация и интенсивность спектральных линий. Этот новый подход, известный как *матричный метод*, привел к замечательным результатам, устранив многие из трудностей, которые преследовали атом Бора.

Еще более недавно мы стали свидетелями возвращения к точке зрения скрытого механизма с помощью волной механики Шредингера. Мы едва ли можем назвать это атомистическим методом, поскольку волны заменяют дискретные частицы. Тем не менее, с точки зрения методологии, общая идея остается той же — основывать наши выводы на вещах, которые нельзя наблюдать.

Не следует думать, что эта двойственная тенденция в науке, противопоставление атомизма общим принципам, микроскопического макроскопическому, возникает из-за каких-то особенностей философии различных ученых. Она обусловлена обстоятельствами, в которых они оказались. Так, мы видим, как теоретический ученый, такой как Эйнштейн,

принимает феноменологическую позицию при исследовании трудностей, сопутствующих отрицательным экспериментам; и мы видим, как тот же ученый, Эйнштейн, принимает атомистическую позицию при изучении проблем броуновского движения, проблем излучения или квантовой теории удельных тепл. Точно так же, когда мы поднимаемся по лестнице, мы поднимаем сначала левую ногу, а затем правую. Это не потому, что мы пришли к выводу, что были неправы, поднимая левую ногу; это потому, что мы не можем продвигаться вперед, если не позволим правой ноге догнать левую. То же самое происходит и в науке; и мы можем быть совершенно уверены, что в будущем, как и в прошлом, мы будем продолжать наблюдать эти периодические переходы от макроскопического к микроскопическому взгляду, от общих принципов к атомизму. Однако мы должны понимать, что с каждым таким переходом мы все выше и выше поднимаемся к недостижимому идеалу — совершенному знанию.

А теперь вернёмся к общему объективному миру классической науки, к миру отдельного пространства и времени, в котором движутся и вибрируют молекулы, атомы и электроны, и в котором присутствуют другие типы реальности, такие как электромагнитные поля. Давайте еще раз напомним, что эта реальная объективная вселенная — это мир, каким его должен представлять себе ученый, если он хочет координировать комплекс своих опытов (сводящихся в конечном счете к сенсорным впечатлениям) простым и последовательным образом. Можно ли отождествлять эту объективную вселенную с реальным миром метафизика — это вопрос, который нам не нужно обсуждать дальше, поскольку он не представляет интереса для науки. Мы хотим исследовать несколько иной вопрос. Следует отметить, что так называемые вторичные качества, такие как цвет, звук и запах, были исключены как самодостаточные сущности. Теперь они приписываются реакциям нашего мозга на нервные возмущения, которые возникают, когда наши органы чувств подвергаются воздействию реальностей общего объективного мира.

Критика часто направлена против научного подхода, согласно которому, сводя качество к количеству, мы устраняем ценности, заменяя, например, цвет красный электромагнитными колебаниями. Конечно, едва ли нужно говорить, что, помимо всех философских соображений, сведение качества к количеству является необходимым условием существования науки. Для иллюстрации: во времена Ньютона вибрационная природа света была неизвестна. Красный свет отличался от зеленого, но это качественное различие проявлялось как несокращаемый факт, который было невозможно объяснить. В этих условиях, если наблюдатель бросался к красному свету или удалялся от него, наука не могла предсказать, какие последствия это вызовет. Однако, как только Френель открыл колебательную природу света, было обнаружено, что красный свет отличается от зеленого из-за более медленной скорости колебаний: тогда стало возможным предвидеть. Можно было предсказать, что если мы приблизимся к красной лампе с достаточной скоростью, она будет казаться зеленой, с большей скоростью — фиолетовой, а с еще большей скоростью — станет невидимой. Точно так же, если мы будем удаляться от света с достаточной скоростью, он также перестанет быть видимым. Это был знаменитый эффект Доплера-Физо, который вскоре удалось обнаружить с помощью астрономических наблюдений; благодаря этому эффекту мы можем определять радиальную скорость приближения или удаления звезд.

Таким образом, мы можем предположить, что практическая полезность постоянных усилий ученого по сведению различий в качестве к различиям в количестве не ставится под сомнение критиком, и что его возражения направлены исключительно против якобы неоправданного философского взгляда, который это сведение качества к количеству оказало на научный ум. Но для того, чтобы исследовать эту проблему, мы должны перейти к

более подробному обсуждению причин, которые заставили ученых проводить различие между так называемыми первичными и вторичными качествами.

Сначала мы ограничимся первичными качествами классической науки и рассмотрим этот вопрос исключительно с точки зрения зрительных восприятий. Например, давайте предположим, что мы смотрим на то, что обычно называют конусом. Когда мы смотрим на этот якобы конический объект, мы воспринимаем его с различными формами в зависимости от нашего относительного положения: мы можем видеть его как круг или как треугольник с прямым или эллиптическим основанием; и таким образом, называя объект конусом, мы даем ему имя, которое не соответствует ни одной из его многочисленных воспринимаемых форм. Таким образом, коническая форма никогда не воспринимается напрямую, а является результатом синтеза всех частных представлений, которые мы можем получить, рассматривая объект с разных сторон. Теперь возникает вопрос: какую из различных форм мы должны назвать *реальной формой* объекта? Одну из многих форм, которые он проявляет при просмотре с последовательных позиций? Или ту форму, к которой мы пришли косвенным образом в результате координации частных взглядов? Конечно, ответ на этот вопрос будет зависеть от того, какое значение мы хотим придать слову «реальность». Если под «реальностью» мы хотим обозначить то, что мы воспринимаем непосредственно, было бы абсурдно называть коническую форму реальной формой, поскольку эта форма никогда не воспринимается непосредственно, а лишь выводится. Однако проблема с этой предварительной интерпретацией реальности заключается в том, что мы никогда не сможем приписать объекту какую-либо определенную форму, поскольку не будет никаких оснований отдавать предпочтение форме, видимой *отсюда*, а не форме, видимой *оттуда*. С другой стороны, если мы придадим слову «реальность» альтернативное значение, *то есть* относящееся к сущности, вытекающей из синтеза частных взглядов, становится возможным (как полагала классическая наука) приписать объекту определенную форму, форму, выходящую за пределы относительного положения и движения воспринимающего. Итак, согласно классической науке, форма больше не была неопределенной, не была вопросом точки зрения: она стала безличной, и мы смогли представить себе объект как имеющий определенную форму даже в мире, лишенном всех наблюдателей. Это был объективный пространственно-временной мир классической науки. Похоже, что если мы хотим сохранить слово «реальность» в двух упомянутых различных значениях, мы должны, по крайней мере, подчеркнуть разницу в значении, говоря о «частной реальности» в первом случае и о «общей или объективной реальности» во втором.

Теперь мы подошли к так называемым вторичным качествам — цвету и звуку. Вот, например, то, что обычно называют красным светом. Мы воспринимаем его как красный, где бы мы ни находились, так что, в отличие от случая с видимой формой, может показаться, что мы вправе утверждать, что свет действительно красный, *то есть* красный в объективном мире, лишенном наблюдателей. Но если теперь, вместо того чтобы занимать последовательность различных положений в покое по отношению к источнику света, мы будем приближаться к свету или удаляться от него с достаточной скоростью, он изменит цвет. Таким образом, цвет, рассматриваемый с беспристрастной объективной точки зрения, так же неопределен, как и видимая форма. Можем ли мы хотя бы объединить эти различные цвета, воспринимаемые различными наблюдателями, в один общий цвет, в котором наши частные восприятия составляли бы лишь разные точки зрения? Само собой разумеется, что эта задача совершенно невыполнима. Другими словами, в случае цвета не существует аналога объективного конуса классической науки, нет возможности говорить об объективном цвете: цвет остается частным. Итак, вот первая причина для различения цвета от реальной объективной трехмерной формы или, опять же, вторичных качеств от первичных.

В предыдущем обсуждении первичных качеств классической науки мы рассматривали исключительно объективную форму. Но в более широком смысле мы должны отнести к первичным качествам все те, которые можно считать проявлением безличного существования. С этим более общим пониманием мы обнаруживаем, что наиболее важные из первичных качеств классической науки были даны такими понятиями, как форма, размер, продолжительность, масса, сила и электрический заряд.

Когда мы рассматриваем новые взгляды, которые навязывает нам теория относительности, мы обнаруживаем, что необходимы определенные уточнения. Специальная теория относительности показала, что не было никаких оснований оспаривать статус тех качеств, которые классическая наука считала первичными, до тех пор, пока мы ограничивали наши исследования точкой зрения наблюдателей, находящихся в покое по отношению к объекту; но когда рассматривались наблюдатели, находящиеся в относительном движении, стало невозможно осуществить синтез всех видимых форм, чтобы получить одну единственную безличную или реальную пространственную форму. Таким образом, реальная форма была лишена статуса первичного качества, и не имело смысла говорить о форме объекта в мире, лишенном наблюдателей. Аналогичные выводы относились к размеру, продолжительности и всем другим упомянутым первичным качествам, за единственным исключением электрического заряда, который сохранил свой безличный статус. Конечно, если бы теория относительности лишила нас возможности представить себе достаточное количество первичных качеств, а значит, и объективный мир, она привела бы нас к тупику. Но мы знаем, что это не так, и что теория лишь изменила список первичных качеств классической науки, присвоив ту же фундаментальную роль другим качествам. Они задаются пространственно-временными интервалами и, в более общем плане, пространственно-временными конфигурациями и тензорами. Другими словами, объективная вселенная, раскрытая теорией относительности, больше не является вселенной формы и продолжительности, или пространства и времени, а является вселенной пространства-времени.

Однако, независимо от фактического перечня качеств, которые следует классифицировать как первичные, значение этих качеств остается одинаковым в обеих науках, поскольку они считаются представляющими сущности, которым можно приписать безличное существование, хотя бы по методологическим причинам.

В этой книге приведено достаточно информации, чтобы читатель мог понять сходство, существующее между сравнительным статусом объективного и частного взгляда, с одной стороны, и между тензорами и компонентами тензора, с другой. Так, если взять пример из электромагнетизма, мы знаем, что наши приборы регистрируют в данной точке в данной системе отсчета интенсивность электрического и магнитного полей. Когда система отсчета меняется, измеряемые значения этих величин изменяются. Таким образом, здесь мы имеем аналог различных видимых форм конуса. И так же, как видимые формы конуса могут быть отнесены к объективному или реальному трехмерному конусу (в классической науке) или к конфигурации пространства-времени (в теории относительности), так и теперь, в теории относительности, электрическая и магнитная интенсивности могут рассматриваться как шесть переменных компонент реального тензора пространства-времени, тензора электромагнитного поля F_{ik} , существующего в объективном мире пространства-времени. Когда мы меняем системы отсчета, тензор остается неизменным в объективном пространственно-временном мире, но его шесть компонентов в системе отсчета пространства и времени, в которой мы находимся, подвергаются определенным изменениям при смене нашей системы отсчета; по этой причине поля, которые кажутся чисто электрическими, когда мы движемся с определенной относительной скоростью, будут казаться электромагнитными, когда наша относительная скорость изменится.

Общая классификация объективных, абсолютных или общественных реальностей, с одной стороны, и относительных или частных реальностей, с другой, может показаться интересной лишь с методологической точки зрения и не имеющей отношения к проблеме подлинной реальности. Но, если для целей аргументации предположить, что понятие подлинно реального имеет смысл, то трудно отрицать, что, если мы когда-либо надеемся обнаружить эту подлинную реальность, то, безусловно, более разумно искать ее в тех реальностях, которые мы имеем основания считать общественными, а не в тех, которые остаются по сути частными. Ведь, как мы видели, частная реальность, такая как цвет или видимая форма (или трехмерная пространственная форма в относительности), является неопределенной до тех пор, пока не будут определены условия наблюдения; следовательно, она не является самодостаточной, но предполагает упоминание о связи с чем-то другим. С другой стороны, обобщенные первичные качества выходят за пределы этой спецификации отношений, которые всегда носят условный характер. Следовательно, помимо соображений методологического порядка, основанных на удобстве, кажется, есть все основания предполагать, что обобщенные первичные качества ближе, чем вторичные, к недостижимому идеалу подлинно реального или метафизической реальности.

Теперь мы должны рассмотреть еще один тип трудностей, с которыми столкнется метафизик, утверждающий, что цвет является реальностью, существующей *сама по себе* в мире, лишенном наблюдателей. На предыдущих страницах, обсуждая относительность цвета по отношению к воспринимающему, мы остановились на относительности цвета по отношению к движению, воплощенной в эффекте Доплера. Но хорошо известно, что различие между первичными и вторичными качествами было установлено задолго до открытия эффекта Доплера. Одна из причин, ответственных за это различие, заключается в том, что цвет во многих случаях также относится к положению. Беркли привел иллюстрацию этого типа относительности, когда писал о облаке, которое, хотя и выглядит багряным *отсюда*, является темным туманом, когда мы проникаем в его внутреннюю часть. Но его иллюстрация была неудачной, потому что, когда мы входим в облако, мы больше не видим его поверхность. Несложно было бы улучшить пример Беркли, но для наших целей

нет необходимости дальше останавливаться на этом типе относительности, поэтому мы рассмотрим другой вид относительности, а именно относительность к калибровке.

Предположим, что на столе лежит зеленый предмет. Метафизик, утверждающий, что цвета являются реальностью, которая существовала бы в мире, лишенном воспринимающих, вероятно, заявил бы, что поверхность предмета по своей сути зеленая. Но вполне может случиться, что, рассматривая поверхность с помощью мощного микроскопа, мы обнаружим, что она состоит из мозаики синих и желтых пятен и что вся зеленая окраска исчезла. Если метафизик не станет полностью игнорировать микроскопическое изображение, он окажется в дилемме, задаваясь вопросом, какую окраску — зеленую или желто-синюю — следует приписать объекту в реальном мире. Но даже в этом случае его проблемы не закончатся (), потому что мы можем представить себе ультрамикроскопическое зрение, по сравнению с которым наше прежнее микроскопическое зрение () будет макроскопическим, и так далее до бесконечности. Теперь изменение цвета, сопровождающее переход от макроскопического к микроскопическому зрению, предполагает, что изменения равной важности могут происходить при каждом последующем переходе к следующему микроскопическому зрению. Действительно, возможно, что для организмов, размер которых был бы порядка длины волны, цвет вообще не проявлялся бы. Поскольку было бы весьма произвольно утверждать, что ультрамикроскопическое зрение в каком-либо смысле менее достойно внимания, чем более привычное макроскопическое, кажется невозможным приписывать определенные цвета существам в мире, лишенном наблюдателей.

Правда, в настоящем обсуждении мы исходили из примера, когда микроскоп позволил нам обнаружить разницу в окраске; и могут возникнуть случаи, когда даже под микроскопом объект все равно будет казаться зеленым. Но, как мы уже говорили, микроскопическое зрение само по себе является ультрамакроскопическим по сравнению с бесконечным регрессом ультрамикроскопического зрения, которое мы можем себе представить; следовательно, даже в этом случае трудность будет только отложена, но не устранена. В конце концов, наша способность переходить от микроскопического к макроскопическому видению ограничена сравнительно узкими пределами. Микроскоп доводит нас до пределов микроскопического видения, но даже он не позволяет нам увидеть некоторые из самых мелких микроорганизмов. Что касается ультрамикроскопа, то он дает лишь размытое изображение. Что же касается ультрамакроскопического видения, то лучшим его примером, по-видимому, является наблюдение Млечного Пути; но это видение, в свою очередь, будет микроскопическим по сравнению с другими, которые мы можем себе представить. Результатом этого обсуждения является то, что когда метафизик говорит о красном цвете, присущем цветку герани, он делает утверждение, которое не выдерживает научной критики.

Сравните эти неоднозначности и трудности с первичным качеством формы в классической науке (не в теории относительности). Ведь в классической науке, если монета признается круглой в результате синтеза определенных микроскопических точек зрения, она останется круглой, когда наблюдатели, расположенные в любом положении, движущиеся с любой скоростью и наблюдающие ее с помощью любого макроскопического зрения, скоординируют свои впечатления. *Благодаря этой относительной нерелевантности наблюдателя*, в классической науке, по-видимому, есть определенное оправдание говорить о круглой монете, существующей в мире, лишенном наблюдателей, тогда как нет никакого оправдания говорить в том же смысле о коричневом цвете монеты.

Следующий этап, который мы должны рассмотреть, касается сведения вторичных качеств к первичным. В то время как до настоящего момента наши аргументы, основанные

на относительности восприятия, применялись исключительно к таким вторичным качествам, как цвет и звук, теперь мы сможем выдвинуть аргументы, применимые к остальным вторичным качествам, таким как тепло и запах.

Обсуждая красный свет, мы сказали, что невозможно синтезировать все цвета, воспринимаемые наблюдателями, движущимися с разной скоростью, и получить из них один определенный, объективный цвет. Тем не менее, мы можем добиться объективности, если сможем рассматривать ощущения цвета как результат определенных специфических электромагнитных возмущений, возникающих в сетчатке в результате воздействия электромагнитных волн. В зависимости от относительного движения наблюдателей объективно реальные электромагнитные волны будут воздействовать на сетчатку с той или иной частотой, и в результате будут возникать соответствующие ощущения цвета. Таким образом, цвет будет проявляться как результат взаимосвязи.

Реалистичный метафизик может возразить, что это, возможно, удобный способ объяснения цвета, но он является искусственным и, несмотря ни на что, цвет следует рассматривать как реальность, существующую *сама по себе*. Но если принять эту точку зрения, то можно также сказать, что шипучесть порошков Сейдлица уже существует *сама по себе* в порошках и ни в коем случае не является результатом взаимосвязи, т. е. химического взаимодействия двух порошков. Или, если взять иллюстрацию Галилея, мы должны сказать, что щекочущее свойство должно быть в перьях, поскольку перо, проходящее по нашей коже, может щекотать нас.

Позиция метафизика кажется несостоятельной, поскольку невозможно отрицать существование взаимосвязей, вызывающих эффекты, которые не существовали до установления этих взаимосвязей и которые часто значительно отличаются от своих причин. И каждый раз, когда мы ощущаем цвет, звук или запах, устанавливается взаимосвязь между неким объективным объектом и тем конкретным органом чувств, на который он воздействует. Дело в том, что человеческий организм является чрезвычайно сложным механизмом и, как правило, он по-разному (хотя иногда и одинаково) реагирует на различные возмущающие влияния; в то же время, насколько нам известно, в других случаях он не реагирует вовсе, и никаких ощущений не регистрируется. Говорить о цвете и звуке как о существующих независимо от организма так же бессмысленно, как обсуждать односторонний треугольник.

Возьмем для примера проблему тепла. Солнце излучает лучи, которые, как обычно считается, являются светящимися и горячими. Если, как утверждает метафизик, горячесть присуща лучам, то мы должны ожидать, что пространство между Землей и Солнцем будет наполнено теплом, а значит, будет теплым. Но это не так. Температура межпланетного пространства близка к абсолютному нулю. С другой стороны, атмосфера нагревается под воздействием солнечных лучей. Почему такая разница? Потому что энергия электромагнитных волн преобразуется в молекулярное возбуждение, когда волны воздействуют на материю, точно так же, как искры возникают при ударе двух кремней друг о друга. Чем более разреженная материя, на которую воздействуют волны, тем меньше будет процент электромагнитной энергии, преобразуемой или разлагающейся в молекулярное возбуждение. Отчасти по этой причине (из-за постепенного разрежения атмосферы) температура постепенно падает по мере подъема на большую высоту в самолете. Сейчас наука утверждает, что в жаркий день, стоя в тени, мы испытываем ощущение тепла, которое является результатом взаимодействия между кончиками наших сенсорных нервов и ударами молекул, составляющих атмосферу. Метафизик, вероятно, не согласится с этим утверждением, заявив, что тепло, которое мы ощущаем, существует независимо от нас в воздухе, и что мы просто обнаруживаем его присутствие. Но если бы его

утверждение было принято, мы должны были бы также предположить, что тепло существовало в лучах солнца и было передано непосредственно от них в воздух. А мы показали, что эта точка зрения несостоятельна, поскольку лучи света производят тепло лишь в результате преобразования своей энергии в энергию другого типа (молекулярное возбуждение). И поскольку кажется невозможным утверждать, что тепло уже было в лучах до их столкновения с материей, какое обоснование есть для утверждения, что тепло уже было в воздухе до его столкновения с нашими сенсорными органами? В каждом случае мы наблюдаем преобразования энергии, и эти преобразования всегда сопровождаются деградацией (за исключением идеально обратимых преобразований). Этот факт выражен законом энтропии, согласно которому, хотя энергия сохраняется в количестве, ее потенциал, или качество, снижается, т. е. деградирует.

Теперь, возвращаясь к проблеме цвета, возможно, что когда световая волна попадает на нашу сетчатку, происходит какое-то химическое изменение (как в случае с фотографической пластиной, где молекула хлорида серебра ослабляется); возможно также, что происходит высвобождение электронов в результате фотоэлектрического эффекта. В любом случае, исходя из других явлений, о которых мы знаем что-то определенное, более чем вероятно, что к тому времени, когда энергия предположительно красной электромагнитной колебания достигает нашего мозга, она подвергается всевозможным преобразованиям. Даже если мы считаем оправданным утверждать, что красный цвет попадает в наш глаз, какое право мы имеем утверждать, что, вопреки всем известным законам физики, этот красный цвет воспринимается нашим сознанием без каких-либо преобразований? И если мы признаем, что физика не является полной мистификацией, как мы можем утверждать, что красный цвет, который мы ощущаем, уже присутствует как красный цвет в электромагнитных излучениях?

Позиция метафизика приведет к еще большим трудностям, если рассмотреть ряд других примеров. Во-первых, наука обнаружила, что электромагнитные колебания, сопровождающиеся цветом, составляют незначительное меньшинство. Существуют электромагнитные колебания различной частоты, идентичные во всех отношениях световым, за исключением того, что они не оказывают влияния на человеческий глаз. Если мы будем строго придерживаться ультрареалистичной точки зрения, то должны будем предположить, что эти невидимые излучения не содержат свойств цвета. И все же, как мы знаем, хотя они и невидимы для человеческого глаза, они регистрируются фотопластинкой и, по всей вероятности, рядом животных. Если бы фотопластинка обладала сознанием или, опять же, если бы наш глаз был снабжен фотопластинкой вместо человеческой сетчатки и зрительного нерва и т. д., цвет красный был бы неизвестен, тогда как новый цвет, ультрафиолетовый, воспринимался бы с легкостью.

Таким образом, невозможно избежать вывода, что на наше точное восприятие цвета влияют особенности глаза и организма. Не стоит останавливаться на ряде хорошо известных примеров, таких как эффект, производимый некоторыми лекарствами. Поэтому, если, защищая реальность цвета, метафизик имеет в виду те цвета, которые может уловить человеческий глаз, он ставит само существование своих реальностей в зависимость от случайного обстоятельства, что человеческий глаз чувствителен к одному конкретному диапазону колебаний и ни к какому другому. Он может освободиться от этой трудности, только предположив, что все электромагнитные волны обладают цветом, видимым или невидимым. Это привело бы его к тому, что он приписал бы цвет радиоволнам. Но почему останавливаться на этом? Почему бы не приписать цвет, звук и запах всему, пока мы этим занимаемся, и говорить о цвете звуковых волн и звуке или запахе электромагнитных волн? Это привело бы нас к полной интеллектуальной анархии. Затем снова рассмотрим явления

интерференции. Красный свет плюс красный свет дают темноту. Если мы рассматриваем красный цвет как объективную реальность, мы должны по крайней мере признать, что должны существовать положительный красный цвет и отрицательный красный цвет, чтобы стало возможным их взаимное уничтожение. Аналогичным образом, существовали бы положительный и отрицательный звук и всевозможные другие абсурдные понятия.

То, что все эти моменты казались спорными в эпоху древних греков, вполне естественно, поскольку они очень мало знали о преобразованиях энергии и ничего не знали о невидимых излучениях, эффекте Доплера, полосах интерференции и т. д. Но в наши дни ультрареалистическая точка зрения совершенно неприемлема для ученого. Читатель, знакомый с научным мышлением, может посчитать, что это долгое обсуждение было совершенно ненужным. Таково было бы и наше мнение, если бы не обилие современной философской литературы, якобы защищающей реальность вторичных качеств. Если бы не несколько научных слов, разбросанных тут и там в их трудах, можно было бы без труда поверить, что эти произведения были написаны людьми, жившими более двух тысяч лет назад.

Другой тип возражений против метода количественного редукционизма заключается в том, что философия природы должна основываться на рассмотрении как качеств, так и количеств. Но критики упускают из виду тот факт, что, постулируя слишком много условий, они могут сделать последовательную философию совершенно невозможной. Цель философии природы должна заключаться в углублении нашего понимания природы. Неясность всегда была препятствием для познания; она мешает нам различать понятия, которые имеют лишь поверхностное сходство, и затуманивает взаимосвязь явлений. По этой причине наука была вынуждена по возможности редуцировать качественные различия, поскольку именно они мешали достижению точной координации.

В том же духе наука всегда стремилась искоренить такие утверждения, как «природа не терпит пустоты» или «химические элементы обладают различными сродствами». Утверждения такого рода, как и аристотелевские качества, бесполезны, поскольку ни к чему не приводят. Прикрывать наше невежество фразами может льстить нашему тщеславию, но ни на йоту не продвигает нас вперед. Короче говоря, хотя ученые и не научили нас многому о цвете и свете, они по крайней мере увеличили наши способности предвидения, а это немалое достижение. Конечно, предвидение — это не все. Наслаждение настоящим также имеет значение, и всегда можно утверждать, что количественное сокращение лишило мир красоты и благородных устремлений. Однако, если это так, почему бы не добавить, что оно также избавило мир от грязи и нищеты? Но такие соображения совершенно не имеют отношения к делу. Нет никаких причин, по которым физик не должен получать столько же удовольствия от красоты музыки, сколько человек, не знающий законов акустики. Следовательно, мы должны раз и навсегда определиться и решить, будем ли мы в нашем стремлении к знанию руководствоваться исключительно и просто своими чувствами, или же будем искать вдохновение в абстрактном интеллектуальном идеале единства и простоты, которым живет теоретическая наука.

Вернёмся теперь к более научной теме. Мы видели, что теория математической физики сводится к рациональной координации большого числа фактов и явлений. Взаимосвязи между этими явлениями позволяют нам переходить от одного к другому по непрерывной цепочке рассуждений и тем самым предвидеть будущее или прошлое на основе знания настоящего. Мы также видели, что возможны различные синтезы фактов, но что, в целом, один конкретный синтез выделялся благодаря своей большей простоте и меньшему количеству вспомогательных гипотез, которые он содержал. Благодаря отсутствию разрозненных гипотез *ad hoc* в этом простейшем синтезе, мы можем ориентироваться, не

теряясь на каждом шагу из-за пробелов и разрывов. Благодаря нашей способности предвидеть и предсказать будущую деятельность природы, мы чувствуем, что нам удалось разгадать ее скрытый замысел и понять ее движущие мотивы. В этой степени мы считаем себя вправе предполагать, что открытые или созданные нами знания соответствуют реальности, хотя, конечно, рассматриваемая реальность остается по сути прагматичной. Эта прагматическая концепция реальности неоднократно подчеркивалась Пуанкаре. Но она ни в коем случае не является особенностью великого математика и философа. Мы находим ее в учениях Эйлера и Римана, а также всех великих ученых последних двух столетий; короче говоря, это философия науки.^[140]

Очевидно, что в научной теории нет ничего, что имело бы характер объяснения. Явления не объясняются; они просто взаимосвязаны или описываются с точки зрения их взаимных отношений. На самом деле, нет причин удивляться этой неспособности науки объяснять явления, поскольку эта неспособность проистекает не из ограниченности науки, а из *ограниченности самого человеческого разума*. Все, что мы можем сделать, — это интерпретировать *A* с точки зрения *B*, а *B* — с точки зрения *C*. Как бы далеко мы ни зашли, мы никогда не сможем избежать окончательного непознаваемого. Это совершенно очевидное утверждение иногда затуманивается, потому что конец серии может быть настолько далек, что ускользает от нашего внимания; но это всего лишь умственный уловка, форма умственной лени.

Таким образом, греки задавались вопросом, почему земля не падает. Вскоре появилось объяснение. Гигант Атлант держит ее на своих плечах. Но что же тогда мешало гиганту Атланту упасть вместе с землей, которую он нес? Нижние области, на которых он стоит, поддерживают его. На этом объяснение заканчивалось, поскольку, по-видимому, не было выдвинуто никакой теории, объясняющей, почему нижние области не упали вместе с Атлантом и землей.

Мы могли бы рассмотреть более научные примеры, но обнаружили бы, что дело всегда обстоит одинаково. *A* описывается с помощью *B*, *B* с помощью *C* и так далее. Рассмотрим явление гравитации. Кто-нибудь действительно думает, что Ньютон или Эйнштейн когда-либо пытались объяснить гравитацию? Сказать, что гравитация является свойством материи или свойством пространства-времени вблизи материи, — это все равно что сказать, что сладость является свойством сахара; ведь в конечном счете, что такое материя, что такое пространство-время? Если мы скажем, что материя — это совокупность молекул, атомов, электронов, протонов, то что из этого следует? Что такое электроны? Что такое протоны? Мы можем только признать свое полное незнание и, пытаясь свести количество этих неизвестных фундаментальных сущностей к минимуму, довольствоваться описанием свойств, которые, по-видимому, их характеризуют, и отношений, которые, по-видимому, их связывают. Очевидно, что те, кто ищет объяснений, не найдут утешения в науке. Им придется обратиться к метафизике.

И все же, на самом деле, эти довольно мрачные выводы мрачны только потому, что мы ожидаем слишком многого. Если мы будем довольствоваться тем, что можем получить, то обнаружим, что описания науки являются творческими и плодотворными, а не бесплодными, как обычно бывает с описаниями. Как мы уже объясняли, научное описание является творческим в том смысле, что оно позволяет нам предвидеть и предсказывать. Описание, которое не могло бы дать нам эту способность, было бы малополезным. Так, мы могли бы описать лепестки и тычинки цветка, описать его цвет, запах и общий вид. Описание такого рода было бы полезно, поскольку позволило бы нам узнать то же растение, когда мы снова встретимся с ним. Но, кроме этого, оно не научило бы нас ничему новому. Оно не рассказало бы нам, например, был ли корень луковистым или волокнистым. С другой

стороны, если в результате длительного ботанического исследования мы смогли бы установить определенные повторяющиеся связи между признаками цветов и другими характеристиками растений, мы могли бы, просто осмотрев цветок, предсказать природу корня. В палеонтологии все то же самое. Обнаружение окаменелой кости часто бывает достаточным, чтобы ученые могли реконструировать весь скелет неизвестного животного. Именно в этом отношении научное описание является творческим и отличается от обычного типа описания, с которым мы сталкиваемся в повседневной жизни.

Мы уже пытались объяснить, что среди всех синтезов экспериментальных фактов, известных науке, некоторые выделялись своей чрезвычайной простотой. В этих привилегированных синтезах были обнаружены простые взаимосвязи, и выражение этих постоянных взаимосвязей составляло законы природы. Если экспериментальных фактов, которые мы пытаемся скоординировать, немного, и если взаимосвязи между явлениями, установленные экспериментом, более или менее грубые и неопределенные, мы можем прийти к определенному синтезу, который будет казаться самым простым. Но если ультраточные эксперименты приводят нас к более точным взаимосвязям, расходящимся с нашими прежними грубыми, или, опять же, если стало известно более широкое множество фактов, вполне может случиться, что наш первоначальный синтез будет неспособен скоординировать все эти результаты, если мы не прибегнем к ряду искусственных корректирующих гипотез. В этом случае мы можем быть вынуждены расширить наш синтез или даже полностью его перестроить. Поэтому мы должны понимать, что синтез никогда не может считаться окончательным, поскольку мы никогда не знаем, что приготовит нам будущее.

То же самое и с нашими гипотезами и теориями. Теории, которые кажутся правдоподобными, когда обращаются к небольшому количеству фактов, часто становятся несостоятельными, когда принимается во внимание большее количество фактов. Рассмотрим, например, теорию гравитации Лесажа. Лесаж предположил, что гравитацию можно объяснить, если предположить, что корпускулы — это частицы (), мчащиеся со огромной скоростью во всех направлениях через пространство. Согласно этой гипотезе, два тела, скажем, Солнце и Земля, взаимно защищают друг друга от воздействия некоторых корпускул. Остаточное действие, вызванное воздействием других корпускул, приводит к сближению Солнца и Земли; таким образом, гравитация объясняется механически. Разумеется, гипотеза Лесажа была не более чем диким предположением, но, несмотря на это, считалось, что в ней все же может быть доля правды.

Астроном Дарвин занялся этой проблемой и доказал, что гравитацию можно объяснить таким образом не только качественно (поскольку этого было бы совершенно недостаточно), но и количественно, при условии, что частицы не обладают никакой упругостью и, следовательно, не отскакивают после столкновения. До сих пор все было в порядке, и теория была приемлемой. Но теперь давайте рассмотрим несколько дополнительных фактов. Гравитация, как мы знаем, оказывает свое действие даже при наличии промежуточных тел. Следовательно, мы должны предположить, что только незначительная часть корпускул будет задерживаться поверхностью Земли. Теперь, если принять во внимание размеры молекул вещества, составляющих Землю, и пустоты, которые их разделяют, на размер, массу и скорость корпускул накладываются определенные ограничения. Кроме того, когда мы понимаем, что Земля движется вокруг Солнца, не замедляя своего движения каким-либо заметным образом, как будто ее движение не встречает никакого сопротивления, мы вынуждены сделать вывод, что плотность газа, образованного корпускулами, не может превышать определенного предела. Принимая во внимание все эти факты, мы приходим к выводу, что теория Лесажа не может быть принята,

поскольку расчеты доказывают, что под воздействием корпускул Земля в очень короткое время стала бы раскаленной добела. Та же самая трудность возникла бы, если бы мы попытались найти *ad hoc* решение, чтобы спасти гипотезу, заменив удары материальных корпускул давлением невидимых электромагнитных излучений (возможно, имеющих природу лучей Милликена). Вместо того чтобы вводить дальнейшие гипотезы, с единственной целью спасти теорию Лесажа, Лоренц предпочел отказаться от нее.

Таким образом, мы видим, что именно благодаря непрерывному накоплению новых фактов научные теории постоянно подвергаются изменениям и пересмотрам. Однако до появления теории Эйнштейна, хотя теории математической физики и подвергались непрерывным изменениям, наши основные представления о пространстве, времени и материи оставались неизменными. Действительно, в этом отношении не было никаких причин отклоняться от первоначальной синтетической модели. Только после проведения сверхточных экспериментов оказалось невозможным сохранить классическую пространственно-временную основу. В результате Эйнштейн был вынужден построить совершенно новую синтезу, основанную на совершенно иной основе — пространстве-времени. Если бы не наши знания о сверхточных экспериментах, конечно, не было бы никаких причин изменять основные характеристики классической синтезы. Из этого мы видим, что синтез, который мы принимаем, зависит от объема наших знаний или, что более важно, от объема нашего незнания о природе.

Между возведением здания и созданием научной теории очень мало общего. Когда возводится здание, мы заранее знаем, какую конструкцию мы собираемся построить, и можем заложить фундамент соответственно. Но в такой эмпирической науке, как физика, конструкция никогда не бывает завершена. Надстройки подвержены постоянным изменениям по мере того, как наши эксперименты становятся более точными и открываются новые явления. В результате мы никогда не можем заложить фундамент раз и навсегда с полной уверенностью. Мы всегда должны быть готовы отказаться от нашей теории, перестроить фундамент и возвести совершенно новую конструкцию.

Казалось бы, нет необходимости дополнительно подчеркивать эти моменты, поскольку они должны быть очевидны для тех, кто хоть немного знаком с достижениями науки. Однако некоторые метафизики-ы считают, что подобные перестройки никогда не должны ставить под угрозу традиционные концепции пространства и времени. Но такая позиция равносильна выводу изучения пространства и времени из-под контроля опыта, поскольку все концепции, к которым мы подходим эмпирически, неизбежно подвержены изменениям по мере того, как наши эксперименты становятся все более точными. Кроме того, если мы примем такую позицию, почему бы не пойти до конца и не утверждать, что открытия лаборатории можно вычислить *априори*? Вся современная наука враждебно относится к философии *априори*. Неевклидова геометрия подорвала ее основы столетие назад, а сегодня физическая теория относительности завершила эту работу. Утверждать во имя логики или разума, как это делали многие философы, что пространство и время должны быть разделены,^[141] или что пространство не может проявлять изменения кривизны от места к месту ^[142] или что пространство-время всегда должно быть плоским,^[143] или что материя должна быть веществом, которое сохраняется, — значит навязывать узкие философские доктрины, которые могут свести на нет весь синтез, сделав невозможной простую схему естественных отношений. Прочитаем Вейля:

«Материя представлялась веществом, участвующим в каждом изменении, и считалось, что каждая частица материи может быть измерена как количество, а ее характерным проявлением как «вещества» является закон сохранения материи, который утверждает, что количество материи остается постоянным при каждом изменении. Это представление,

которое до сих пор отражало наши знания о пространстве и материи и которое во многих кругах философы провозглашали *априорным* знанием, абсолютно общим и необходимым, сегодня представляет собой шаткое сооружение. Сначала физики, в лице Фарадея и Максвелла, предложили «электромагнитное поле» в противоположность материи, как реальность другой категории. Затем, в прошлом веке, математики, следуя другой линии мышления, тайно подорвали веру в доказательства евклидовой геометрии. И теперь, в наше время, разразился катаклизм, который смел пространство, время и материю, до сих пор считавшиеся самыми прочными столпами естественных наук, но только для того, чтобы освободить место для более широкого взгляда на вещи и более глубокого видения».

Подводя итог, можно сказать, что в естественных науках необходимо остерегаться фундаментальных предпосылок, которые, как утверждается, навязываются нам требованиями логики или грубым восприятием.

Однако, с другой стороны, следует признать, что когда нам удастся построить некую возвышенную научную синтезу, которая учитывает факты опыта, наша синтеза всегда должна быть такой, чтобы позволять нам объяснять факты грубого наблюдения; ведь они, в той же степени, что и результаты сверхточных экспериментов, составляют факты, которые необходимо координировать. Теория, подобная теории Эйнштейна, не должна противоречить кажущейся отдельности пространства и времени, когда явления исследуются только обычным грубым способом посредством обычного наблюдения. Другими словами, научный синтез должен сводиться к первоначальному синтезу, когда не требуется слишком большая точность, так что первоначальный синтез должен предстать в свете первого приближения. Теория Эйнштейна удовлетворяет этому общему условию во всех отношениях. Как мы видели, при низких скоростях или при грубом наблюдении классическая разделённость пространства и времени вновь утверждает себя; следовательно, между теорией относительности и обычным наблюдением нет противоречия. Аналогичные выводы применимы к классическому сложению скоростей. Это также подтверждается в первом приближении.

Теперь можно было бы утверждать, что, поскольку научная теория, по-видимому, отрицает всякую окончательность, было бы лучше прекратить теоретизировать и довольствоваться простым накоплением фактов. Но такая позиция была бы несостоятельной, поскольку научные теории, хотя и неизбежно неточны с долгосрочной точки зрения, тем не менее необходимы для существования знания. Простое накопление несвязанных фактов не составило бы науки, именно потому, что, будучи несвязанными, факты не дали бы нам возможности предсказать будущую последовательность событий. В этих условиях лучше руководствоваться несовершенным синтезом, который мы можем улучшить по мере накопления опыта, чем не руководствоваться ничем. Кроме того, координации и теории, которые впоследствии оказались явно неточными, все же привели к открытию новых фактов.

Так, закон Ньютона, который сегодня признан неточным, привел к открытию Нептуна; он позволил астрономам утверждать, что это была одна и та же комета, которая появлялась через определенные промежутки времени. Опять же, благодаря закону Ньютона в 1675 году Рёмер открыл конечную скорость света, тем самым развеяв веру в то, что существование события и наше восприятие его являются одновременными явлениями. Все эти открытия были бы сделаны другими способами в более поздний период, но следует признать, что благодаря закону гравитации они были значительно ускорены. Действительно, только в XIX веке конечная скорость света была установлена путем прямых наземных измерений.

В других случаях научная теория, будь она верна или ложна, направляет физиков к важным экспериментам, о которых они, возможно, никогда бы не подумали. Астрономическая экспедиция Эддингтона была вызвана открытиями Эйнштейна; если бы эта теория была неизвестна, то, вероятно, изгиб света, когда он был наконец наблюден, был бы расценен как ошибка наблюдения или как результат какого-то случайного возмущающего влияния. В таких условиях это явление, возможно, никогда не стало бы постоянным научным фактом; то же самое и с эффектом Эйнштейна. Независимо от того, сохранится ли теория Эйнштейна или будет отвергнута завтра, она, по крайней мере, привела к открытию новых фактов.

Кроме того, мы должны помнить, что каждая последующая теория сохраняет определенные элементы той, которую она заменила. Она поднимается на более высокий уровень, но поднимается с того уровня, который был установлен ее предшественницей. Эти элементы постоянства мы найдем не в физических гипотезах, а в самих уравнениях, поскольку именно они составляют отношения реальности. Физические гипотезы, как они были сформулированы изначально, являются лишь удобными опорами более или менее временного характера. Это особенно заметно в последующих теориях электричества и магнетизма. От первоначальных теорий Кулона и Ампера до современных теорий Лармора и Лоренца, модифицированных открытиями Эйнштейна, мы проходим через промежуточные теории Максвелла, Гельмгольца и Герца. Мы можем проследить уравнения через эти преобразования и увидеть, как они были дополнены добавлением дополнительных членов или уточнением уже имеющихся. Так, уравнения Максвелла отличаются от уравнений Ампера добавлением нового члена. Лоренц принимает уравнение Максвелла о свободном эфире без изменений; только при наличии материи () добавляются уточнения. Опять же, гравитационные уравнения Эйнштейна вырождаются в уравнения Ньютона, когда поле слабое, а скорости малы.

Когда мы понимаем, что все эти последовательные уточнения в теориях были вызваны желанием скоординировать все большее количество фактов, кажется, что ученый имеет очень мало контроля над ходом своей теории, поскольку в каждом случае его руководят критерии простоты координации.

Однако может быть интересно проверить, не существуют ли, помимо этих формальных соображений, другие причины, побуждающие ученых к своим решениям. Можно утверждать, что различные мыслители исходят из разных исходных философских предпосылок, и что именно эти предпосылки, а не количество скоординированных фактов, ответственны за различия в природе теорий и выводов. Мнение такого рода высказывали многие философы, которые уделяли внимание тому, что они называют «метафизикой науки»; но мы можем сразу сказать, что это мнение кажется совершенно необоснованным. Исключительно критерий простоты координации определяет направление науки. Личные особенности мыслителя могут сыграть роль в том, что его первоначальные попытки координации будут направлены в одном направлении, а не в другом; но если простая координация окажется невозможной в первоначально выбранном направлении, то в должное время будут предприняты другие попытки в совершенно иных направлениях. Конечным результатом может стать координация, имеющая совершенно иное философское значение, чем изначально предпочитаемое; и эта перемена обусловлена фактами дела, а не изменением философских фантазий. Конечно, непросто человеку нелегко понять такое положение дел, поскольку ученые обычно не ведут дневники, в которых упоминают все свои заброшенные попытки. Когда теория становится предметом широкого обсуждения, она обычно представляется в окончательном виде, и многочисленные колебания и частичные попытки, которые могли продолжаться в течение многих лет, полностью упускаются из

виду. И все же, если мы вернемся к первоначальным научным работам, эти колебания и изменения в отношении становятся очевидными.

Приводить примеры было бы утомительно, ведь они встречаются повсюду. Однако мы можем процитировать несколько абзацев из статьи Эйнштейна «Космологические соображения по общей теории относительности». Мы увидим, что он долго колебался между несколькими альтернативами, прежде чем даже рассмотреть возможность существования конечной вселенной. Мы читаем:

«В настоящем параграфе я проведу читателя по пути, по которому прошел сам, довольно тернистому и извилистому, потому что иначе я не могу надеяться, что он проявит большой интерес к результату в конце пути. На этом этапе, с любезной помощью математика Дж. Громмера, я исследовал центрально-симметричные гравитационные поля, вырождающиеся в бесконечности упомянутым образом. Но здесь оказалось, что для системы неподвижных звезд никакие граничные условия такого рода вообще не могут быть приняты во внимание, как это недавно справедливо подчеркнул астроном де Ситтер... В любом случае, наши расчеты убедили меня, что такие условия вырождения для *gik* в пространственной бесконечности не могут быть постулированы.

«После неудачи этой попытки возникают две возможности. [\[144\]](#) ... Из сказанного видно, что мне не удалось сформулировать граничные условия для пространственной бесконечности. Тем не менее, все еще есть возможный выход, не отказываясь от предложенного в пункте (b). Ведь если бы можно было рассматривать Вселенную как континуум, который является *конечным (замкнутым) в отношении своих пространственных измерений*, нам вообще не понадобились бы какие-либо такие граничные условия».

И то же самое происходит во всех других случаях. Предпринимается ряд попыток скоординировать факты, и научный мир принимает самое простое решение, пока какие-то новые экспериментальные результаты не вступают с ним в противоречие.

Конечно, все эти утверждения страдали бы неизлечимой неопределенностью, если бы возник спор о том, что составляет простоту. Но какова бы ни была причина, мы видим, что согласие между учеными в этом отношении поразительно. Никогда не было двух высокоразвитых теорий, согласующих одно и то же количество фактов, в которых по общему согласию одна не признавалась бы гораздо более простой, чем другая; точно так же, как математическое выражение, содержащее один член, проще, чем выражение, содержащее два.

Показательным примером может служить сравнение координации гравитации и механики Эйнштейна и Ньютона. Если мы рассматриваем исключительно факты движения планет и механики, известные Ньютону, то законы механики Ньютона и его закон гравитации являются гораздо более простыми. Но если мы дополним известные ему факты более поздними открытиями, то преимущество будет на стороне синтеза Эйнштейна, поскольку координация Ньютона потребует ряда дополнительных гипотез *ad hoc*. Точно так же, что касается нашего повседневного опыта, невращающаяся Земля является более простым решением, тогда как с учетом движения планет верно обратное. Конечно, может случиться так, что более простой синтез будет противоречить определенным философским предрассудкам, но возражения такого рода в конечном итоге всегда уступают место более высокому критерию простоты. Ведь мы знаем, что люди в конце концов приняли точку зрения Галилео.

Если же мы можем предположить, что критерий простоты не представляет дальнейших трудностей, то проблема сводится к определению того, вводит ли теоретический физик некритично предварительные предположения и допущения. Здесь мы имеем дело исключительно с физиками и теоретическими физиками, а не с чистыми математиками, чья методика совершенно иная. Чтобы прояснить эти моменты, мы кратко рассмотрим некоторые из основных предпосылок, которые являются общими для физиков. Хотя мы опасаемся, что будет невозможно избежать некоторого повторения, тем не менее важность темы такова, что придется пожертвовать просто элегантною изложением.

Цель науки, как мы уже сказали, состоит в том, чтобы координировать факты и тем самым получить общие знания, которые будут действительны для всех людей. Но наша координация, дедукция и индукция должны проводиться в соответствии с жесткими правилами, которые будут признаны всеми людьми. В отсутствие таких общих правил два человека, исходя из одних и тех же предпосылок, пришли бы к разным выводам; в результате общие знания, а значит и наука, были бы невозможны. Мы будем исходить из того, что правила логического мышления послужат нашей цели в этом отношении.

Здесь, конечно, можно возразить, что мы невольно вводим допущение, когда утверждаем, что существа, которые не соблюдают одни и те же правила рассуждения, не смогут прийти к согласию. Конечно, если мы примем столь гиперкритическую позицию, то не останется ничего, о чем можно было бы спорить. В тот момент, когда мы начинаем говорить, мы исходя из прошлого опыта предполагаем, что будут издаваться звуки и что наши слова будут передавать хотя бы какой-то смысл нашему соседу. То же самое и с правилами логики. Независимо от того, каков онтологический статус этих правил, мы можем предположить, что, исходя из прошлого опыта, людям удобно их соблюдать, если они хотят построить общую науку.

Рассмотрим теперь, что ученые понимают под *единообразием природы*. Единоеобразие природы можно интерпретировать по-разному. Оно может означать, что природа регулируется универсальными законами. В этой форме оно, очевидно, не является некритически принятой предпосылкой. Первобытный человек не чувствует в этом необходимости; он предпочитает верить в чудеса. Если современный физик принимает эту однородность, то только потому, что она была подтверждена *апостериорно* в таком большом количестве случаев, что кажется проще принять ее, чем отвергнуть, по крайней мере до дальнейшего уведомления. Кроме того, это предположение, которое вполне признается как имеющее ограниченную силу, и ученые первыми подозревают, что после более микроскопического исследования природы оно может оказаться несостоятельным. Природа может быть нерациональной, и наша логика может быть неспособна справиться с ней. Если это так, то статистические знания могут быть единственным возможным типом знаний, хотя даже статистические знания могут подвести нас.

Мы также можем понимать однородность природы в другом смысле. Мы можем подразумевать, что эксперимент, проведенный в понедельник, даст тот же результат, если его повторить во вторник. Другими словами, ход времени, хотя и влияет на нас во многих отношениях (старение и т. д.), в некоторых важных случаях можно не принимать во внимание. Предположим, для целей дискуссии, что мы оспариваем правомерность этого предположения; к чему это приведет? Очевидно, что наука станет невозможной. Геометрическое доказательство, которое было верно во времена Евклида (), сегодня уже не будет верным; знания станут непередаваемыми. Не было бы смысла проводить эксперимент сегодня, поскольку завтра наши выводы утратили бы всякую ценность.

Фактически, было бы бессмысленно пытаться проводить какие-либо эксперименты, поскольку каждый эксперимент занимает определенное время. В таком мире предвидение было бы совершенно невозможно; о правилах поведения не могло бы быть и речи. Поскольку одной из важнейших функций науки является предоставление нам правил поведения, мы понимаем, что наука стала бы немыслимой. Это выявляет важное различие между наукой и, например, историей. История рассказывает нам о событиях прошлого, которые, насколько нам известно, могут никогда не повториться; но в науке явление, которое никогда не может повториться, представляет мало интереса. Короче говоря, мы должны согласиться с тем, что само существование общей науки доказывает, что наше предположение о единообразии природы, будь оно оправданным или нет *sub specie æternitatis*, оправдано по крайней мере в той ограниченной области опыта, которая принадлежит нам. Поэтому ни в коем случае нельзя путать нашу веру с некритически принятой предпосылкой.

На самом деле, даже если бы мы были уверены, что однородность природы — ошибочное убеждение, мы все равно продолжали бы руководствоваться им. Мы прекрасно знаем, что однородность нашего земного существования не является постоянной; мы знаем, что, хотя мы просыпаемся каждый день, в любой момент мы можем умереть. Но если мы не хотим существовать в состоянии полной стагнации, мы должны действовать так, как будто наша жизнь будет продолжаться, и поэтому мы строим планы на будущее. В этих условиях кажется бессмысленным искать какое-либо рациональное обоснование однородности природы, основывая наши аргументы на соображениях вероятности. Тот факт, что вещи существовали до сегодняшнего дня, не доказывает, что они будут существовать завтра, но он подсказывает нам, что мы должны действовать так, как будто они будут существовать.

Среди принципов особого упоминания заслуживает «принцип достаточного основания». В физической науке применение этого принципа сопряжено со всевозможными трудностями. Например, когда мы утверждаем, что нет причины, по которой тело должно двигаться *сюда*, а не *туда*, мы предполагаем, что обладаем по крайней мере общим знанием всех возможных влияний, которые могут иметь место.

Очевидно, что наше предположение может привести нас к ошибочным выводам. Мы упомянули об одном из таких случаев при обсуждении проблемы пространства. Предполагая, что пространство совершенно пустое, принцип достаточного основания предполагал, что оно должно быть однородным и изотропным; но поскольку мы ни в коем случае не были уверены, что физическое пространство действительно пустое, применение этого принципа не имело большого значения.

Трудности такого рода ни в коем случае не ограничиваются проблемами физики. Даже в чистой математике не всегда легко решить, каким образом следует применять этот принцип. Математические проблемы, в которых мы вынуждены прибегать к принципу достаточного основания, связаны с вероятностями; и следующая элементарная иллюстрация, обсуждаемая Берtrandом, даст нам пример того типа трудностей, с которыми мы можем столкнуться. Предположим, например, что нас спрашивают: «Какова вероятность того, что при случайном проведении прямой линии отрезок, содержащийся в данном круге, будет больше стороны равностороннего треугольника, вписанного в этот круг?»

Теперь, если мы представим себе все возможные прямые линии, пересекающие окружность, достаточная причина подсказывает нам, что любая из этих линий может быть начерчена с одинаковой вероятностью. Следовательно, искомая вероятность будет задана отношением числа различных линий, удовлетворяющих нашему заданному условию, к общему числу различных линий, которые могут быть начерчены так, чтобы пересекать

окружность. Очевидно, что последнее число будет получено путем рассмотрения всех прямых, проходящих через данную точку окружности, а затем представления этой точки как занимающей последовательно каждое положение на указанной окружности. При этих условиях вероятность оказывается равной $\frac{1}{3}$. Но мы могли бы с равным основанием поступить иначе. Мы могли бы рассмотреть все прямые линии, параллельные заданному направлению, а затем представить себе, что это направление последовательно принимает все возможные ориентации. В этом случае вероятность составила бы $\frac{1}{2}$. Этот пример предупреждает нас о том, что даже в самых элементарных задачах, где привлекается достаточная причина, скрывается большая доля произвольности.

Что касается регулирующих норм, которые направляют научные открытия, то мы видели, что они сводятся к поиску единства в разнообразии, к стремлению к обобщению, к обнаружению единообразия или законов и, таким образом, к экономии усилий, как метко сказал Мах. Эти же регулирующие нормы столь же очевидны в математике, как и в физике, и их учитывали все ученые от Демокрита до современников.

Мы могли бы также упомянуть *принцип непрерывности* и *принцип причинности*, как их понимают современные ученые. Принцип непрерывности подразумевает исключение любого воздействия на расстоянии, как это показано в законе всемирного тяготения Ньютона. Вероятно, вера в принцип непрерывности проистекает из того факта, что в повседневной жизни все воздействия, кажется, передаются через контакт. Опять же, объект перемещается из «здесь» в «там» через непрерывную серию промежуточных положений, или, по крайней мере, когда это не так, мы перестаем признавать его тем же объектом. Сам Ньютон чувствовал необходимость придерживаться принципа непрерывности, но в его время развитие теоретической науки не было достаточно продвинутое, чтобы позволить реализовать его надежды. По той же причине физики XVIII и XIX веков уделяли этому принципу мало внимания. Предполагалось, что частицы притягиваются друг к другу в соответствии с определенными законами, но вопрос о том, как передается это притяжение, никогда не обсуждался.

Только когда, в результате открытий Максвелла, было обнаружено, что электромагнитная индукция распространяется посредством непрерывного воздействия через среду, популярность этого принципа возросла. Это приводит нас к **физике поля**, к открытию новой категории, отличной от материи, а именно электромагнитного поля. Эйнштейну удалось поставить гравитацию на ту же основу, что и электромагнетизм, тем самым устранив действие Ньютона на расстоянии. Однако даже в этом случае не обязательно был принцип, который привел его к его уравнениям; именно изучение фактов, скоординированных в его теории, привело его к этому принципу. С такими заметными первоначальными успехами физики поля было вполне естественно стремиться к их дальнейшему расширению и интерпретации материи с точки зрения поля. Сегодня эта попытка, похоже, была заброшена, но опять же не из-за изменения философской точки зрения, а из-за огромных технических трудностей, с которыми пришлось столкнуться. Как говорит Вейль: «Между тем я полностью отказался от этих надежд, возрожденных теорией Ми, и не верю, что проблема материи может быть решена с помощью одной только теории поля» ().

Принцип причинности, как его понимают Эйнштейн и современные научные авторы, относится к феноменологическому мировоззрению. Таким образом, абсолютное пространство Ньютона считается противоречащим причинности. Сегодня мы должны признать, что, в целом, феноменологический взгляд является правилом среди физиков, и для этого есть очень веская причина. До тех пор, пока мы можем интерпретировать осязаемые эффекты с точки зрения осязаемых причин, нет никакого смысла прибегать к

сверхощутимым причинам, о которых можно безнаказанно постулировать что угодно. Правда, во многих случаях может быть невозможно обнаружить ощутимые причины, и не предполагается, что весь мир может быть построен только из ощутимых сущностей. Тем не менее, всякий раз, когда можно избежать сверхощутимых причин, всегда следует избегать их. Однако следует отметить, что этот последний принцип не имеет одинаковой силы для всех физиков.

И теперь мы подошли к совершенно другому типу предположений, так называемым научным гипотезам. Они никогда не навязываются нам *априори* как неизбежные; они представляют собой лишь предположения, сформулированные с целью согласования известных фактов опыта. Как таковые, они зависят от нашего знания этих фактов, никогда не принимаются слепо и могут меняться со временем по мере расширения или уточнения этого знания. Тем не менее, если явления, к которым они применяются, кажутся более фундаментальными, чем те, которые мы изучаем, гипотезы автоматически войдут в наши дальнейшие координации и будут присутствовать в свете предположений. Например, задолго до того, как кинетическая теория газов (основанная на физической гипотезе) была установлена так же твердо, как сегодня, все новые явления, относящиеся к газам, интерпретировались с точки зрения кинетической теории.

Как мы уже сказали, основная цель этих физических гипотез — дать нам возможность координировать факты; молекулярная гипотеза, кинетическая теория газов, квантовая гипотеза, эфир и абсолютность или относительность пространства — все это типичные примеры. В ряде случаев формулировка этих физических гипотез была достигнута в результате высокотехнических теоретических рассуждений, связанных с уравнениями математической физики. Под этим мы подразумеваем, что их обоснование может быть ясно только тогда, когда разработано математическое представление рассматриваемых явлений. В отсутствие этого математического представления они никогда бы даже не возникли, и их полезность никогда бы не могла быть предсказана. Гипотеза Планка о дискретной природе излучения света является одним из таких примеров.

В ряде других случаев физические гипотезы возникают гораздо проще, без необходимости рассматривать математическую обработку проблемы. Например, гипотеза Френеля об эфире была сформулирована как очевидный способ объяснения волновой природы света, которая, по-видимому, была неизбежна в результате его знаменитого эксперимента с двумя зеркалами. Абсолютное пространство Ньютона — еще один пример физической гипотезы, которая, по-видимому, навязывается почти сразу же, когда принимаются во внимание динамические факты движения.

Часто бывает, что эти физические гипотезы, задуманные в первую очередь для координации фактов, впоследствии оказываются соответствующими физической реальности (атомы, электроны). В других случаях не было проведено никаких последующих экспериментов, которые бы их подтвердили. В качестве иллюстрации можно привести Риза, который предположил существование атома магнетизма, *магнетона*, чтобы объяснить спектральный ряд. Вайс также пришел к аналогичной гипотезе при изучении некоторых магнитных явлений. Однако до сих пор все попытки изолировать магнетон закончились неудачей, и вполне возможно, что такой объект не существует в физической реальности. ^[145] Тем не менее, хотя физические гипотезы часто не подтверждаются дальнейшими экспериментами, они могут служить полезной цели. Эфир Френеля был отвергнут, но он был полезен Френелю и его непосредственным последователям.

Подводя итог, мы видим, что необходимо проводить четкое различие между такими предварительными предположениями, как физические гипотезы, и более

фундаментальными предположениями, которые, по-видимому, требуются самими требованиями научного знания. Это не означает, что последние предположения представляют собой абсолютную уверенность; это просто означает, что они должны быть обязательно приняты, по крайней мере, предварительно, если мы не согласны сдаться и отказаться от всех попыток сформулировать науку. Если же мы замечаем то, что кажется радикальными изменениями в научной точке зрения, мы не должны приписывать эти изменения изменениям в метафизике науки; верно как раз обратное. Изменения в научной точке зрения вызваны открытием новых фактов, и именно эти изменения в научном подходе являются причиной изменения философского взгляда ученого на мир. В этом нет ничего удивительного. Люди могли бы вечно философствовать о пространстве, материи и бесконечности, давая логические определения по своему усмотрению, но если бы они не приняли во внимание факты, которые открыли математика, физика и науки в целом, мы сегодня были бы так же невежественны во всех этих вопросах, как и наши предки.

Однако автор прекрасно понимает, что такая общая линия рассуждений не представляет большого интереса. Единственный способ понять эту тему — рассмотреть конкретные примеры. Для этой цели мы выбрали систему Коперника в противовес системе Птолемея и, наконец, всю проблему относительности пространства и движения, простирающуюся от Галилея до Эйнштейна. Мы увидим, что огромные изменения, произошедшие в научном мировоззрении, всегда происходили одним и тем же образом — под давлением фактов.

Предположим, например, что мы начинаем науку с нуля и в соответствии с нашими примитивными представлениями предполагаем, что Земля неподвижна, а звезды вращаются вокруг нее. После столетий наблюдений мы, вероятно, обнаружили бы, что звезды не являются неподвижными по отношению друг к другу, поскольку последовательные карты неба показали бы, что формы созвездий не являются неизменными. Вероятно, мы пришли бы к выводу, что звезды являются светящимися телами, свободно движущимися в бесконечном пространстве. Тогда для нас было бы вполне естественным последовать примеру греков и предположить, что свободные тела описывают круги, поскольку круговое движение является самым благородным из всех движений. Но, с другой стороны, наблюдая за камнем, скользящим по гладкой поверхности льда, мы бы поняли, что движение свободных тел на поверхности Земли кажется прямолинейным. Таким образом, в законах движения возникла бы двойственность, которая усложнила бы наше понимание механики и синтез природных явлений.

В конце концов, какой-нибудь мыслитель утверждал бы, что свободное движение тел было прямолинейным, но что звезды, прикрепленные к концентрическим кристаллическим сферам, были вынуждены двигаться по кругам. Таким образом, двойственность в законах движения свободных тел была бы устранена; но сомнительно, не было бы ли лекарство хуже болезни. Ведь с нашими кристаллическими сферами была бы *введена* искусственная гипотеза, не имеющая ощутимой связи с каким-либо другим из известных явлений.

Продолжая эксперименты, мы могли бы заметить, что на поверхности тел, вращающихся относительно Земли, появляются странные силы. В конце концов мы могли бы начертить график этих сил и разделить их на центробежные и силы Кориолиса. Позже было бы обнаружено множество любопытных явлений, происходящих на поверхности Земли. Мы заметили бы, что пассаты и морские течения неизменно следуют наклонным курсам, что циклоны всегда вращаются против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии, что реки, текущие на север в северном полушарии, имеют тенденцию размывать свои восточные берега. Также были бы обнаружены выпуклость экватора и уменьшение веса по мере продвижения к тропикам. Еще позже были бы изучены такие любопытные эксперименты, как маятник Фуко и гироскопический компас; и все эти

отдельные открытия остались бы несвязанными, если бы мы не накопили одну гипотезу за другой.

Наконец, появился бы какой-нибудь гений и сказал: «Почему бы все эти явления не привести в порядок, если предположить, что Земля вращается, а величина этого вращения рассчитывается по отношению к системе осей, фиксированных по отношению к звездам. Это вращение повлечет за собой существование поля центробежных и кориолисовых сил на поверхности Земли, как и на всех вращающихся телах; и в результате все странные, несвязанные между собой явления, которые были отмечены, вполне естественным образом впишутся в совершенно простую и последовательную синтезу».

До сих пор мы видели, что, предполагая, что Земля вращается, и относя движение к внеземной системе отсчета, мы значительно упростили наш синтез при рассмотрении чисто механических экспериментов, проводимых на поверхности Земли. Но это упрощение станет еще более очевидным, если принять во внимание движения планет. До тех пор, пока в нашем описании этих движений мы будем относиться наши измерения к системе отсчета Земли, движения различных планет будут казаться очень хаотичными. Однако после длительных наблюдений будут выявлены определенные закономерности, и мы сможем построить очень сложный часовой механизм, который будет отображать движения Солнца, Луны и планет. Именно это и сделал Птолемей. Затем, ускорив движение нашего механизма, мы сможем предсказать положения Солнца, Луны и планет в какой-то момент в будущем. Таким образом, можно будет более или менее точно предсказывать наступление затмений. Но дело в том, что эта модель могла дать нам только то, что мы в нее вложили. Мы могли предсказывать будущее положение планет, потому что обнаружили закономерности в их движении. Но если бы случайно в солнечную систему забрела какая-нибудь блуждающая комета, нам было бы совершенно невозможно предсказать ее движение. Таким образом, наши возможности предвидения были бы чрезвычайно ограниченными.

Затем мы должны рассмотреть другой тип явления, впервые замеченного Гиппархом. Мы имеем в виду прецессию равноденствий, согласно которой Полярная звезда, по-видимому, постепенно удаляется от направления истинного севера, чтобы в конце концов вернуться, описав круг за 28 000 лет. Чтобы завершить нашу модель, необходимо было бы принять во внимание это явление, предположив, что все небо колеблется, как волчок. Все эти и многие другие явления выглядели бы как множество отдельных эмпирических открытий, и никакой связи между ними нельзя было бы установить, если только не нагромождать одну искусственную гипотезу на другую, пока природа не была бы лишена всякой единства. [\[146\]](#) Короче говоря, мы бы лишь смогли описать явления так же, как мы могли бы описать узоры на крыльях бабочки, но наше описание было бы в основном бесплодным. В общем случае предвидение было бы невозможно, и любое открытие, подобное открытию Нептуна Леверрье, сделанному на основе особенного движения Урана, было бы совершенно невозможно, поскольку не было бы найдено никакой математической связи между движениями различных планет.

Но так же, как все трудности, с которыми мы сталкивались в механике, исчезли, когда мы заменили описание движения терминами инерциальной системы отсчета (системы, привязанной к звездам), так и теперь, снова взяв ту же систему отсчета, мы можем преодолеть все упомянутые астрономические трудности и восстановить гармонию и единство в природе. Как мы знаем, Кеплер отнес последовательные положения планет (полученные из наблюдений Тихо Браге) к инерциальной системе отсчета. Он обнаружил, что, если отнести к этой системе, каждая планета описывает эллипс вокруг Солнца, причем Солнце находится в одном из фокусов эллипса. Законы Кеплера о движении планет были тогда следующими:

1. Планеты описывают эллипсы вокруг Солнца.
2. Их движения подчиняются закону площадей, под которым мы понимаем, что радиус-вектор, соединяющий Солнце с планетой, охватывает равные площади за равное время.
3. Квадрат времени, необходимого планете для описания своей орбиты, пропорционален кубу большой оси описанной эллипса.

Это законы Кеплера. Они представляют собой значительный прогресс по сравнению с описанием Птолемея, поскольку, помимо многочисленных преимуществ, связанных с выбором инерциальной системы отсчета в земной механике, эти законы кажутся чрезвычайно простыми и могут быть выражены в лаконичной математической форме. Но большое значение законов Кеплера заключается в том, что они сделали возможными открытия Ньютона.

Ньютон утверждал, что, поскольку в инерциальной системе отсчета свободные тела, по видимому, движутся по прямолинейным траекториям с постоянной скоростью, вероятно, что на планеты действуют силы, которые мешают им следовать своим естественным траекториям. Теперь второй закон Кеплера, закон площадей, совместим только с существованием силы, направленной в любое время вдоль линии, соединяющей Солнце и планету. Поскольку планеты описывали замкнутые кривые вокруг Солнца, эта сила, очевидно, была силой притяжения к Солнцу. Первый и третий законы Кеплера, рассматриваемые совместно, позволили Ньютону определить точный численный закон солнечного притяжения, закон обратной квадратичной зависимости. Кроме того, эллиптическое движение Луны вокруг Земли, как оно выглядело в инерциальной системе отсчета, предполагало существование аналогичного закона притяжения между Луной и Землей. Поэтому казалось вероятным, что мы имеем дело с общим воздействием материи на материю, и Ньютон обнаружил, что явление веса можно объяснить *не только качественно, но и количественно*, если предположить, что материя всегда притягивает материю. Таким образом, он пришел к формулировке своего закона всеобщего притяжения.

Легко видеть, что описание Ньютона гораздо более творческое, чем описание Кеплера, и тем более, чем описание Птолемея. Таким образом, законы Кеплера позволяют нам лишь предсказывать будущие положения планет, и ничего больше. Если бы мы следовали этим законам, то, вероятно, должны были бы предположить, что эллиптические орбиты — единственные, которые могут существовать. Закон Ньютона, с другой стороны, позволяет нам предсказать, что другие типы орбит (параболы и гиперболы) в равной степени способны существовать, и таким образом движения некоторых комет включаются в общую синтезу. Все, что нам нужно сделать, это отметить мгновенное положение и скорость тела по отношению к Солнцу, и мы сразу же сможем предсказать точную орбиту, по которой оно будет двигаться. Следовательно, наши возможности предвидения, вытекающие из закона Ньютона, гораздо больше, чем в дни Кеплера.

Снова рассмотрим явление прецессии равноденствий. До открытий Ньютона это явление всегда было загадкой, не связанной со всеми другими явлениями. Теперь его причина ясна. Оно обусловлено неравномерным притяжением, оказываемым Солнцем и Луной на нашу планету, вызванным ее радиально несимметричной формой (иллюстрируемой выпуклостью ее экватора). Результатом будет периодическое колебание оси Земли по отношению к Солнцу. Благодаря вращению Земли () это колебательное движение будет генерировать гироскопическую пару, которая заставит нашу планету качаться, как волчок. В результате, даже если бы астрономы не знали о явлении прецессии, математики предсказали бы его как неизбежное следствие асимметричной формы Земли и закона гравитации. И так происходит в бесчисленных случаях. Таким образом, описание Ньютона

расширило рамки общего синтеза природы. Оно показало тесную связь, которая существует между такими, казалось бы, независимыми явлениями, как движение циклонов, явление приливов и отливов, ощущение веса, движение планет, прецессия равноденствий, годовые изменения углов абберрации и т. д. Оно позволило нам предсказать существование одного явления на основе другого. Все эти открытия стали возможными благодаря нашему выбору инерциальной системы отсчета для движения; таким образом, мы понимаем, что описание с точки зрения инерциальной системы отсчета является творческим, в то время как описание с точки зрения невращающейся Земли никуда нас не приводит.

Конечно, теперь, когда мы так много узнали благодаря введению инерциальной системы отсчета, ничто не мешает нам интерпретировать все наши результаты и все наши взаимосвязи, так сказать, в обратном порядке, с точки зрения невращающейся Земли. Но, перенося таким образом все результаты, полученные из первого описания, в новое описание, мы не получили бы действительно нового описания; все, чего мы достигли бы, — это пародия на первое. Точно так же запись, проигрываемая в обратном порядке на пианале, не является новой мелодией, а лишь пародией на оригинальную. Очевидно, что это не тот метод, которому мы должны следовать, когда стремимся построить новую синтезу. Мы не должны просто переносить результаты старого синтеза в терминах нового; мы должны действовать напрямую.

Но тогда, в проблеме, которую мы здесь обсуждаем, если бы описание в терминах инерциальной системы отсчета было неизвестно, движение Солнца по отношению к неподвижной Земле было бы настолько сложным, что не поддавалось бы математическому исследованию. С точки зрения Земли, Солнце казалось бы вращающимся вокруг нее каждые 24 часа (не учитывая мелочи); а поскольку в разные сезоны года его расстояние от Земли менялось бы, его траектория представляла бы собой спираль, расширяющуюся, а затем сжимающуюся каждые шесть месяцев.

В этих условиях закон площадей не был бы соблюден; то есть, если бы мы рассматривали линию, соединяющую Солнце с Землей, она не охватывала бы равные площади за равное время. Теперь, общая теорема механики доказывает, что всякий раз, когда тело движется под действием притяжения центрального тела, закон площадей всегда подтверждается; отсюда мы должны сделать вывод, что Солнце никогда не могло бы рассматриваться как вращающееся вокруг Земли под действием одного только притяжения Земли. Пришлось бы ввести дополнительные силы, но их введение было бы настолько произвольным, а математические трудности настолько велики, что даже Ньютон мог бы оказаться в тупике; и мы остались бы столь же невежественными в отношении гармонии небес, как и греки.

В рассмотренных примерах мы ограничились проблемами крайней простоты; но даже в этих простых проблемах мы видели, что разные описания, хотя и эквивалентные в теории, были далеки от эквивалентности на практике. Когда мы переходим к рассмотрению более сложных проблем, таких как те, с которыми имеет дело современная наука, уникальность одного конкретного типа описания выделяется с еще большей определенностью, и именно это конкретное простое непрерывное описание, в котором все гармонично и связано, считается реальным описанием. Только следуя этому единственному описанию, мы можем предвосхитить природу, заранее предсказывая ее действия, и в результате утверждать, что мы открыли реальность.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы: с чисто кинематической точки зрения, при рассмотрении движения планет проще использовать инерциальную систему отсчета в качестве системы координат; в этом заключается суть открытия Коперника. Кроме того, при рассмотрении динамических явлений проще выбрать инерциальную систему отсчета, относительно которой будет измеряться вращение. Короче говоря, инерциальная система отсчета навязывает себя как способствующая простейшей интерпретации всех явлений, будь то механических или астрономических, так что мы можем сказать, что в пространстве существует привилегированная система отсчета. Здесь мы просто констатируем факты, которые никоим образом не подлежат спору.

Конечно, мы могли бы довольствоваться этим открытием и не задумываться о «почему» и «зачем». Но если мы хотим пойти дальше, если мы хотим найти очевидную причину существования привилегированной системы отсчета в пространстве, мы приходим к одному из двух выводов. Либо мы должны сказать, что существование привилегированной системы отсчета вытекает из самой природы пространства, и в этом случае мы приходим к пространству, которое обладает динамическими свойствами *как таковыми*; и это абсолютное пространство, в котором инерциальная система отсчета является привилегированной, потому что она не вращается. Или же мы должны предположить, что само пространство не имеет к этому никакого отношения, и что существование привилегированной системы отсчета проистекает из посторонних условий, из наличия звезд, воли Высшего Существа, формы Земли, количества существующих планет или чего-либо еще, что мы можем себе представить.

Нет ни малейшего сомнения в том, что пока мы ограничиваем свое внимание ограниченным числом фактов, известных Ньютону, простейшим решением является первое, и его принятие составляет существенную характеристику позиции Ньютона. Однако нет никакой необходимости представлять себе это абсолютное пространство в свете метафизической реальности. Все, что нам нужно сказать, это: все происходит так, как будто существует абсолютный фон пространства, следовательно, как будто существует абсолютное пространство. Такова была позиция классической науки до появления теории Эйнштейна. Мы надеемся прояснить эти важные моменты в ходе этой главы.

До Ньютона проблема пространства и движения, по-видимому, была предметом догадок. Если упомянуть только двух современников Ньютона, то Декарт предполагал, что движение является относительным, а Мор предполагал, что движение и пространство являются абсолютными. Эти предположения не были подкреплены какими-либо научными доказательствами. Правда, Мор, например, по-видимому, осознавал необходимость приводить научные примеры в поддержку своих утверждений, но его иллюстрации были слишком плохо интерпретированы, чтобы представлять какой-либо научный интерес. Так, в письме Декарту он отмечает, что человек, идущий быстрым шагом, испытывает усталость, в то время как его друг, лежащий в покое, не испытывает ее; отсюда Мор делает вывод, что движение и пространство должны быть абсолютными. Но если бы он рассмотрел человека, стоящего неподвижно в течение нескольких часов, в то время как его друг уезжает, сидя в карете, можно было бы задаться вопросом, к какому выводу он бы тогда пришел.

Второй аргумент, представленный Мором, не имеет большей ценности. Его упрощенная форма выглядит следующим образом: два поезда проходят мимо друг друга, двигаясь в противоположных направлениях. Если бы движение было относительным, мы могли бы утверждать, что по отношению к первому поезду телеграфный столб мчится на север, а по отношению ко второму поезду он движется на юг. Поскольку столб не может двигаться одновременно на север и на юг, относительное движение не может существовать, и поэтому столб должен находиться в покое в абсолютном пространстве; отсюда Мор делает вывод, что пространство должно быть абсолютным.

Едва ли нужно говорить, что аргументы Ньютона были совершенно иного калибра, и даже сегодня кажется чрезвычайно трудным опровергнуть их в полном объеме. Ньютон был одним из первых сторонников научного метода. Как он сам говорит:

«Лучший и самый надежный метод философствования, по-видимому, заключается в том, чтобы сначала тщательно исследовать свойства вещей и установить их с помощью экспериментов, а затем искать гипотезы для их объяснения... Гипотезы должны служить лишь для объяснения свойств вещей и не должны пытаться их предопределять, за исключением тех случаев, когда они могут помочь в экспериментах».

Эти высказывания Ньютона кажутся совершенно ясными и просто отражают дух научного подхода. Однако многие философы, писавшие о «метафизике науки», считают, что Ньютон отступил от своего заявленного эмпирического метода, когда сформулировал свою теорию абсолютного пространства и времени. Трудно поверить, что кто-либо, знакомый с механикой, мог бы когда-либо придерживаться такого мнения, но, поскольку оно, по-видимому, широко распространено в определенных кругах, может быть интересно рассмотреть его утверждения.

Можно сказать, что этот вопрос имеет первостепенное значение, поскольку если бы было установлено, что абсолютное движение Ньютона не было навязано динамическими фактами механики, было бы невозможно понять философское значение цилиндрической вселенной Эйнштейна.

Вернёмся же к изложению Ньютона. В «Началах» он начинает с выражения своей веры в абсолютное неподвижное пространство, одинаковое везде, и в абсолютное время. За этими утверждениями следует описание эксперимента с вращающимся ведром с водой и других экспериментов подобного рода. По мнению критика, Ньютон явно намеревался, чтобы абсолютное пространство и время рассматривались в свете необходимых предпосылок. Но, помимо того факта, что в порядке написания утверждения об абсолютном пространстве и времени предшествуют любым ссылкам на эксперименты, оснований для такого убеждения, по-видимому, нет. Здесь мы должны помнить, что Ньютон был ученым, писавшим для своих коллег-ученых; и математики обычно следуют методу, при котором сначала формулируется утверждение, а затем показывается, почему это утверждение должно быть принято как правильное. Хотя утверждение предшествует доказательству, никто не будет введен в заблуждение, полагая, что нас просят принять это утверждение в свете философского предположения, которое может вызвать споры, а затем рассматривать доказательство как аргумент второстепенного значения. То же самое и с абсолютным пространством и временем. Так же как Евклид после утверждения геометрического предложения приводит соответствующее доказательство, так и Ньютон приступает к доказательству существования абсолютного пространства, показывая, что абсолютное вращение подтверждается рядом экспериментов (в частности, экспериментом с вращающимся ведром с водой). Если бы проявления абсолютного движения были неизвестны Ньютону, если бы абсолютное движение ускользало от эксперимента, у него никогда не было бы причин постулировать его существование в физике; в результате его прямые следствия, а именно абсолютное пространство и время, были бы сведены к бессмысленным гипотезам и перестали бы быть необходимыми выводами.

Фактически, Ньютон явно упоминает два метода представления, которых можно придерживаться. Так, в его «Оптике» мы читаем:

«С помощью этого метода анализа мы можем продвигаться от соединений к ингредиентам, от движений к силам, которые их производят, и в целом от следствий к причинам, от частных причин к более общим, пока аргументация не приведет нас к самому общему. Это метод анализа, а синтез состоит в том, *чтобы принять обнаруженные и установленные в качестве принципов причины* и с их помощью объяснить явления, вытекающие из них, и доказать эти объяснения» [\[147\]](#).

В качестве иллюстрации этих двух методов можно рассмотреть случай закона всемирного тяготения. Мы можем сказать: было обнаружено, что планеты описывают конические сечения вокруг Солнца с определенными движениями, и чтобы объяснить эти движения, мы должны предположить существование солнечного притяжения; или же мы можем сказать: закон всемирного тяготения таков-то и таков-то, и доказательством этого является то, что планеты описывают конические сечения вокруг Солнца. С точки зрения ясности изложения предпочтительным является дедуктивный метод, но с точки зрения хронологического порядка открытий ситуацию описывает первый метод.

Давайте же не будем больше тратить время на обсуждение этих совершенно очевидных моментов, которые Ньютон снова и снова объясняет в ответ на критику своих современников. Важный вопрос, который необходимо решить, лежит в другой плоскости. Правда ли, что, как предполагал Ньютон, динамические факты движения, установленные эмпирически и проиллюстрированные в эксперименте с вращающимся ведром, делают абсолютное движение, а значит и абсолютное пространство, неизбежными? Здесь мы можем позволить себе заметить, что вопрос такого рода должен быть оставлен на усмотрение ученых, обученных в школе строгого мышления. Действительно, очевидно, что критики, такие как Беркли и Кант, которые имели настолько смутные представления о механике, что

путали скорость и ускорение, импульс и силу, были слишком плохо подготовлены, чтобы высказывать какие-либо ценные мнения.^[148] Обращаясь к вердикту последующих ученых, таких как Эйлер, Лаплас и Пуанкаре, мы видим, что их вывод единодушен. Абсолютное пространство признается всеми как простейшая физическая гипотеза, которая объясняет наблюдаемые механические факты. В этой степени оно соответствует реальности. Даже Эйнштейн, которому мы обязаны падением ньютоновской позиции, признает, что с учетом фактов, которыми располагал Ньютон, его решение было единственным, которое можно было отстаивать.

Теперь мы рассмотрим эти основные проблемы более подробно и постараемся понять, почему Ньютон был вынужден принять абсолютное движение. Поскольку абсолютность или относительность движения не могут быть решены *априорным* рассуждением, мы вынуждены обратиться к эксперименту. Предположим, что мы проводим механические эксперименты внутри какой-то гигантской жесткой коробки. Факты, выявленные экспериментом, будут следующими: До тех пор, пока по отношению к этому ящику звезды кажутся находящимися в фиксированных положениях, ход наших экспериментов будет оставаться неизменным, независимо от того, проводим ли мы их в этой или в той части ящика. Другими словами, наши механические эксперименты не дают нам возможности определить наше местоположение в пространстве. Из этого мы можем сделать вывод, что эксперимент указывает на *относительность положения*, что означает, что положение может быть определено только по отношению к другим телам или, по крайней мере, к наблюдаемым точкам отсчета. Эта относительность положения влечет за собой, как прямое следствие, *однородность пространства*. Точно так же мы должны обнаружить, что ориентация нашей коробки, вместе с ориентацией содержащегося в ней механического аппарата, также не проявится в ходе нашего эксперимента; отсюда мы делаем вывод об *относительности ориентации*, или *изотропии пространства*.

Но как насчет движения в пространстве? Сам факт относительности положения в пространстве может на первый взгляд навести на мысль, что движение, будучи простым изменением положения, также должно быть относительным. Но и в этом случае мы имеем дело с проблемой физики, а не чистой математики или метафизики. Теперь, если мы проведем наш механический эксперимент сначала в коробке, которая не вращается относительно звезд, а затем в коробке, которая находится в относительном вращении, в ходе эксперимента можно обнаружить значительное изменение. Однако относительность движения подразумевает, что это изменение в характере относительного движения коробки не должно влечь за собой заметной разницы; следовательно, мы вынуждены сделать вывод, что в отличие от положения и ориентации, движение не может быть относительным. Движение в пространстве не является просто вопросом точки зрения; мы можем обнаружить его даже при отсутствии каких-либо заметных ориентиров в пространстве.

Более тщательное изучение этой проблемы привело Ньютона к разграничению двух общих категорий движения: одна из них казалась относительной, поскольку ее было невозможно обнаружить в отсутствие ориентиров в пространстве; другая казалась абсолютной, поскольку сопровождалась физическими возмущениями и динамическими проявлениями, которые можно было обнаружить и измерить, не принимая во внимание ориентиры в пространстве. Поезд, плавно движущийся по прямой трассе с постоянной скоростью, является примером относительного типа движения, в то время как объект, вращающийся относительно звезд, или корабль, качающийся на море, являются примерами абсолютного типа. Короче говоря, положение, ориентация и определенный тип движения проявлялись как относительные, в то время как некоторые другие типы движения

проявлялись как абсолютные. Это были факты эксперимента, которые были обобщены *законом инерции* или, опять же, *галилеевым* или *ньютоновским принципом относительности*. Именно эта двойственность в проявлениях движения делает классическую механику столь неудовлетворительной.

Перед Ньютоном стояли два пути:

1. Либо он мог предположить, что пространство является абсолютным; что все движения являются абсолютными, но что только ускоренные и вращательные движения могут быть обнаружены с помощью механических экспериментов;

2. Или же он мог предположить, что пространство обладает двойственной природой: абсолютной для вращательных движений, но относительной для равномерных поступательных, или галилеевых, движений.

Ньютон предпочел первый вариант; и ньютоновский принцип относительности, который подчеркивал невозможность обнаружить абсолютную скорость *с помощью механических экспериментов*, действовал как демпфер *не* на абсолютную природу пространства и движения, а на нашу способность механически обнаруживать абсолютную скорость.

Было несколько причин, которые, несомненно, побудили его к такому выбору. Во-первых, двойственность природы пространства и движения было нелегко представить. Кроме того, обстоятельством, которое повлияло на последователей Ньютона, был тот факт, что, в конце концов, ньютоновский принцип относительности касался исключительно механических явлений. Все еще было возможно, что электромагнитные эксперименты выявят абсолютную скорость, в которую верил Ньютон, но которая всегда ускользала от науки.

Тем не менее, многие последователи Ньютона предпочли принять вторую альтернативу. Они предположили, что эксперименты выявили двойственность в природе или структуре пространства и доказали его относительность для равномерного поступательного движения. Их не беспокоил тот факт, что электромагнитные и оптические эксперименты в конечном итоге могут привести к обнаружению абсолютной скорости, поскольку они утверждали, что в случае успеха таких экспериментов они выявят лишь скорость движения через эфир, а не абсолютную скорость движения через пустое пространство. Согласно этой точке зрения, ньютоновский принцип относительности больше не подчеркивал неспособность механических экспериментов обнаружить абсолютную скорость в пустом пространстве, а подчеркивал тот факт, что *абсолютная скорость была совершенно бессмысленной*.

Теперь важный момент заключается в следующем: какую бы из двух предыдущих точек зрения мы ни приняли, точку зрения Ньютона или точку зрения многих его последователей, пространство в любом случае должно оставаться абсолютным. Ведь в любом случае пространство будет абсолютным для ускорения и вращения, независимо от того, каким оно окажется для скорости. Точно так же, если объект имеет слабый цвет, он все равно окрашен; слабость окраски не может изменить этот факт. Следовательно, когда мы рассматриваем пространство, весь вопрос сводится к следующей проблеме: действительно ли вращательное движение является абсолютным? Если нет, то, следовательно, если центробежная сила не может быть отнесена к вращению в пространстве, откуда же возникает эта сила?

Конечно, здесь мы сталкиваемся с чрезвычайно сложной проблемой. Когда, изменяя внешние условия по своему усмотрению, мы можем вызвать изменения в величине, мы

можем утверждать, что эта величина относительна по отношению к окружающим условиям; например, вес тела изменяется в зависимости от его расстояния от Земли. С другой стороны, когда ничто из того, что мы можем сделать, не дает ни малейшего эффекта, мы утверждаем, что величина является абсолютной; масса в классической науке была типичным примером. Однако очевидно, что тест такого рода имеет чисто отрицательную ценность по той простой причине, что многие внешние условия находятся за пределами нашей возможности изменять. Например, мы не можем уничтожить звезды, солнце или электроны. Таким образом, в то время как величина, которая была установлена как относительная, предположительно останется относительной на все времена, такой же степени уверенности больше нельзя требовать от наших определений абсолютных величин. Тем не менее, если мы не хотим впасть в состояние полного агностицизма, мы вынуждены установить разницу между величинами, которые кажутся абсолютными в нынешнем состоянии наших знаний, и теми, которые, как известно, являются относительными. Поэтому, если мы предпочитаем, мы можем называть абсолюты «относительно-абсолютными», где слово «относительный» подразумевает ограниченность наших нынешних средств исследования.

Аргументы Ньютона в пользу абсолютного пространства можно представить несколькими разными способами. Следующие иллюстрации могут помочь прояснить несколько дополнительных моментов. Рассмотрим гигантский круглый диск, вокруг центральной оси которого звезды, как кажется, вращаются по часовой стрелке с угловой скоростью ω . Предположим, что на диске живут существа, обитающие вокруг его центра; далее предположим, что плотные облака скрывают звезды от их взора, так что у них нет никаких оснований даже подозревать, что их диск может вращаться. Эти люди, естественно, будут относиться ко всему движению по отношению к своему диску, так же как до Коперника и Галилея люди привыкли относиться ко всему движению по отношению к поверхности Земли.

Предположим, что они решили провести механические эксперименты. Вскоре они обнаружили бы, что ни один объект не может оставаться неподвижным на диске, если он не помещен в самый центр или не закреплен искусственным способом. В частности, все объекты, первоначально закрепленные в какой-либо нецентральной точке, а затем внезапно освобожденные, начали бы радиально удаляться от центра, а затем постепенно следовать по кривой траектории, двигаясь по часовой стрелке по расширяющейся спирали. Однако в некоторых случаях тело может описывать истинную окружность вокруг центра; но всякий раз, когда происходит такое круговое движение, оно всегда направлено по часовой стрелке, и, кроме того, его угловая скорость неизменно определяется определенной постоянной величиной ω . С другой стороны, если бильярдные шары были бы выпущены во всех направлениях с одинаковой начальной скоростью из некоторой нецентральной точки, ни одна из их траекторий не была бы похожа на другую; не наблюдалось бы ни малейшей симметрии, и движения по часовой стрелке всегда были бы присутствовать. Можно понять, что для людей, утверждавших, что пространство однородно и везде одинаково, эту асимметрию в движениях тел было бы трудно объяснить.

Предположим, что непосредственно над первым диском вращается второй диск по часовой стрелке с угловой скоростью ω . Жители этого второго диска обнаружили бы, что тела остаются в покое, где бы они ни находились на их диске, что приведенные в движение тела движутся по прямой с постоянной скоростью и, короче говоря, что асимметрия, характерная для нижнего диска, сменяется совершенной симметрией движения, при которой ни одно из направлений не является привилегированным. Кроме того, в то время как жители нижнего диска испытывали бы большие трудности с возвращением в центр, если бы они случайно от него отклонились, и в то время как они всегда ощущали бы

действие несимметричных сил, когда они двигались, жители верхнего диска могли бы двигаться, как им заблагорассудится, и никогда не подвергаться действию сил.

Таковы были бы факты. Теперь, если бы движение было относительным, мы не могли бы предположить, что между движениями двух дисков существует какая-либо абсолютная разница; любой диск вращался бы, но только по отношению к другому диску, принятому за эталон. Однако здесь мы видим, что независимо от того, предполагается ли существование метафизической разницы, совершенно очевидно, что в условиях, царящих на двух дисках, существует огромная физическая разница.

И поэтому мы естественным образом задаемся вопросом: что вызывает эту асимметрию в однородном изотропном пространстве? В науке всегда предпочтительнее искать причины в явлениях, которые, так сказать, осязаемы, а не в невидимых факторах, поскольку это требует меньше догадок. Однако в данном случае () никакой видимой причины не может быть. Правда, если бы облако рассеялось, жители нижнего диска могли бы заметить, что по отношению к их миру звезды вращаются по часовой стрелке с угловой скоростью ω , тогда как жители верхнего диска заметили бы, что звезды кажутся неподвижными. Если бы наши наблюдатели были твердо убеждены в относительности движения, утверждая, что абсолютное движение в пространстве немыслимо, они могли бы попытаться найти причину всех этих несимметричных явлений в состоянии относительного вращения или покоя звезд.

Но если бы они не смогли приписать определенное причинное влияние этому вращению звезд, решение не было бы решением. Хотя сейчас кажется, что они могли бы угадать правильно, в эпоху Ньютона было бы совершенно невозможно оправдать такую точку зрения; не по философским причинам, а из-за еще неразвитого состояния математики и физики. Поскольку это решение было для них недоступно, им не оставалось ничего другого, как смело обратиться к сверхчувственному абсолютному пространству и признать, что нижний диск вращался против часовой стрелки в абсолютном пространстве с угловой скоростью ω , в то время как верхний диск и звезды находились в покое. Отныне причинное влияние приписывалось бы структуре самого абсолютного пространства, а отмеченные выше расхождения объяснялись бы с совершенной математической точностью. (Эта иллюстрация, конечно, является лишь альтернативным способом представления эксперимента Ньютона с ведром воды).

Мы снова приходим к тем же выводам, когда рассматриваем проблему инерции. Если здесь, там и везде — это одно и то же, почему мы должны прилагать усилия, чтобы переместить тело отсюда туда?

Опять же, если бы все движение было относительным, единственным значимым типом движения было бы движение относительно системы отсчета. Но тогда, если по отношению к одной системе отсчета траектория свободного тела была бы прямой, по отношению к другой системе отсчета она была бы кривой или изогнутой. Другими словами, не имело бы смысла обсуждать абсолютный курс тела, поскольку, выбрав подходящую систему отсчета, мы могли бы сделать его любым, каким бы нам ни хотелось. Кстати, закон инерции тем самым лишился бы всякого смысла.

Рассмотрим, таким образом, несколько произвольно выбранных свободных тел, находящихся в относительном движении друг относительно друга. Эти тела могут полностью игнорировать свое взаимное присутствие (даже если предположить, что они наделены сознанием). Поэтому, если бы была выбрана система отсчета, не было бы никаких оснований предполагать, что, относительно этой системы, движения различных тел должны быть каким-либо образом связаны. И все же закон инерции, выведенный из эксперимента, доказывает, что наши предположения были бы неверны.

Ведь если мы выберем определенную привилегированную систему отсчета, инерциальную или галилееву, то все тела будут описывать прямые линии с постоянными скоростями, как будто между ними существует какое-то тайное соглашение. Неужели это наша система отсчета навязывает это соглашение неразумным телам? Неужели тела видят систему отсчета и соглашаются вести себя по отношению к ней одинаково? Но система отсчета может находиться за миллионы миль; кроме того, она существует только в результате нашей свободной воли; и представления тел друг о друге, очевидно, останутся прежними, даже если будет выбрана какая-то новая система отсчета или одновременно будет выбрано несколько разных систем. Если мы отказываемся согласиться с тем, что именно абсолютное пространство направляет и ведет свободные тела и, таким образом, является причиной этой чудесной заранее установленной гармонии, где же еще мы можем искать регулирующую причину? Если мы откажемся от поисков, мы снова вернемся к чудесному. Должны ли мы снова обратиться к звездам? Но мы уже сказали, что во времена Ньютона это было невозможно. Кажется, есть только одно решение, и это абсолютное пространство.

Если мы обобщим все эти результаты, то увидим, что, нравится нам это или нет, динамические факты движения и закон инерции делают невозможным уход от абсолютного движения и пространства. Конечно, как говорит нам Эйнштейн, Ньютон мог бы с таким же успехом назвать свое абсолютное пространство «эфиром» или чем-то еще. Суть заключалась в том, что, по-видимому, требовалось нечто, действующее как абсолютный фон, чтобы объяснить неоспоримую реальность центробежной силы, порождаемой определенными типами движения.

В любом случае, именно по динамическим причинам, изложенным выше, и только по ним, Ньютон был вынужден прибегнуть к абсолютному пространству. С точки зрения науки, это единственный аспект открытий Ньютона, представляющий интерес. Однако Ньютон, после того как он научно доказал существование абсолютного пространства, приступил к его слиянию со своими теологическими идеями, отождествляя его с существованием Божественного Существа. Это, конечно, было его правом, но эти дальнейшие спекуляции были вненаучными и были поставлены на один уровень с его сочинениями о рогатой зверюге Вавилона или бездонной яме Апокалипсиса.

Мы можем быть совершенно уверены, что если бы абсолютное пространство было основано на соображениях чисто философского, теологического или теософского характера, оно никогда не выдержало бы критики последующих ученых: некоторые философские школы отстаивали бы его, другие атаковали бы, но ученые без исключения отвергли бы его как не имеющее эмпирического или рационального основания. То, что великий авторитет Ньютона был недостаточен для обеспечения принятия его идей, видно, если мы рассмотрим судьбу его корпускулярной теории света или его облегчение в связи с невозможностью построить ахроматическую линзу. Но в случае абсолютного пространства мы видим, что именно потому, что оно было основано на фактах опыта, оно просуществовало до совсем недавнего времени, когда под натиском Эйнштейна начало рушиться. Тем не менее, мы должны помнить, что только благодаря недавнему открытию новых фактов, неизвестных Ньютону, Эйнштейн смог опровергнуть абсолютную доктрину, и, кроме того, как мы увидим, краеугольный камень механики Ньютона, абсолютная природа вращения, даже сегодня далеко не разрушен.

Как говорит Вейль, обсуждая динамические факты движения: «Именно эти факты с времен Ньютона заставляют нас придавать абсолютное значение не перемещению, а

вращению». В следующем отрывке Эйлер выражает то же мнение, дополняя его утверждением, что метафизическая природа пространства и времени не имеет отношения к позиции Ньютона. Мы читаем:

«Мы не утверждаем, что такое абсолютное пространство существует».

И снова в другом месте:

«Сущность пространства и времени не важна, важно то, необходимы ли они для формулировки закона инерции. Если этот закон можно полностью и ясно объяснить только с помощью понятий абсолютного пространства и абсолютного времени, то необходимость этих понятий можно считать доказанной».

Очень четкое заявление Эйлера подчеркивает прагматическое и антиметафизическое отношение к реальности, характерное для научного мышления. Не понимая значения научных гипотез, философы идеалистической школы считали своим долгом отказаться от абсолютного пространства. Если бы их нападки ограничивались теологическими высказываниями Ньютона, не было бы причин критиковать их аргументы, поскольку все теологические мнения можно либо защищать, либо критиковать. Но их неспособность понять более глубокие научные причины, которые привели Ньютона к абсолютному пространству, привела их к ошибочному убеждению, что механические явления могут быть одинаково хорошо объяснены гипотезой относительности пространства и движения. На самом деле, они должны были понять, что научная гипотеза абсолютного пространства совершенно независима от нашего философского предпочтения реализма или идеализма. В классической науке пространство было абсолютным в научном смысле как для идеалистов, так и для реалистов. Действительно, многие научные последователи Ньютона рассматривали природу с идеалистической точки зрения, но они никогда не считали нужным опровергать абсолютное пространство и движение Ньютона по этому поводу.

А теперь рассмотрим одно из типичных возражений, выдвигаемых против абсолютного пространства Ньютона. Утверждается, что если, как говорит Ньютон, пространство является абсолютно однородным и бесконечным, то из этого следует, что положение в пространстве, а значит и движение в пространстве, не имеют смысла, поскольку нет возможности отличить одно положение от другого. Такой аргумент вполне справедлив, если мы рассматриваем чисто *аморфное* математическое пространство; он теряет свою силу, когда мы рассматриваем пространство, такое как пространство Ньютона, которое, как предполагается, имеет жесткую структуру. Чтобы доказать это, давайте предположим, что пространство, хотя и однородное, ограничено сферой. В этом случае однородность пространства не мешала бы (по мнению критиков) реальности движения, поскольку мы всегда могли бы отнести движение к границе.

Предположим, что граница была бы удалена в бесконечность: потеряло бы движение в пространстве постепенно всякий смысл? Кажется совершенно ненужным принимать такую точку зрения. Нет никаких причин, по которым прохождение материи через жесткое однородное пространство не могло бы вызвать локальный эффект, независимо от того, находится ли граница на конечном расстоянии или в бесконечности. Говоря очень грубо, нет никаких причин, по которым отдельные точки абсолютного пространства не могли бы осознавать присутствие или отсутствие, а значит, и прохождение, кусков материи; и таким образом, граница не играла бы никакой роли.

Движение казалось бы бессмысленным, если бы мы предположили, что материя является непрерывной (не атомной), и рассмотрели бы материальный стержень бесконечной длины, скользящий по прямой линии, которую он определяет. В этом случае (с

точки зрения точек пространства) движение стержня могло бы остаться незамеченным. Однако в общем случае, когда речь идет о скоплениях материи, а значит, о прерывности (независимо от молекулярной гипотезы), не кажется, что есть причина отвергать абсолютное движение в пустом пространстве на том основании, что движение в однородной и бесконечной среде было бы логически бессмысленным. Кроме того, непонятно, как критик, убедивший себя в том, что движение должно быть относительным, предлагает объяснить физический факт, что из двух маховиков, вращающихся относительно друг друга, один взрывается, а другой остается незатронутым. Либо мы должны предположить, как Мах, что материальная вселенная оказывает определенное причинное влияние на тело, вращающееся относительно нее, либо мы должны принять абсолютное пространство Ньютона.

Критика Беркли, по-видимому, возникла из такого аргумента, как тот, который мы только что обсудили. Так, он говорит нам, что абсолютное движение невозможно представить и по этой причине оно должно быть изгнано из науки. Затем он указывает, что движение может означать только смещение по отношению к чему-то осязаемому, а поскольку пространство является сверхчувственным, движение через пространство не имеет смысла. Совершенно верно утверждать, что люди изначально пришли к представлению о движении через визуальный опыт, наблюдая движение одного тела относительно другого. Другими словами, *форономическое* представление о движении является естественным.

Но даже если согласиться с этими утверждениями, остается фактом, что мы не можем втискивать наши научные координаты в форму, которая удовлетворяла бы слишком узкому феноменологическому подходу. В физике, как и в чистой математике, мы часто сталкиваемся с концепциями, которые может быть трудно представить. Так, хотя наше понимание непрерывности происходит из опыта, например, когда мы проводим пальцем по столу, концепция непрерывности должна была быть глубоко расширена и проработана математиками. Непрерывные кривые без касательных нелегко представить, но мы не можем отрицать их существование только потому, что это слишком напрягает наше воображение. Мы также не можем отрицать, что в кубе столько же точек, сколько на одной из его граней, поскольку Кантор доказал, что это действительно так.

То же самое и в физике. Эксперимент предоставляет нам определенные факты, которые мы часто можем интерпретировать по-разному. Но мы не можем игнорировать факты только потому, что они противоречат нашей собственной философии. Все, что мы можем сделать, это повторить слова одного испанского короля, что если бы мы были Богом, мы построили бы вселенную проще. Однако, не будучи Богом, мы должны сделать все возможное в этой сложной ситуации. Теперь, в случае движения, любая философия, которая начинает исключать абсолютное движение, сразу же сталкивается с трудностью объяснения центробежной силы. Беркли, как и следовало ожидать, полностью проваливается в этом вопросе. Его аргументы сводятся к критике абсолютного пространства, не предлагая нам никакого лучшего решения. Кроме того, его предпосылки научно неверны.

Например, критикуя доказательство Ньютона об абсолютном пространстве, иллюстрируемое экспериментом с вращающимся ведром с водой, он замечает, что из-за скорости Земли по ее орбите частицы воды не могут описывать круги. Таким образом, аргумент Ньютона, якобы обнаруживший абсолютное круговое движение, был бы неверным. Аргумент Беркли показывает ту же самую повторяющуюся путаницу между скоростью и ускорением; он не понимает, что Ньютон не утверждает, что скорость в абсолютном пространстве можно обнаружить с помощью механических экспериментов; принцип относительности Ньютона ясно указывает на это. Только ускорение вызывает

силы. Что же касается частиц воды, то они обладают одинаковым ускорением, независимо от того, вращаются ли они по кругу или описывают циклоиды. Следовательно, эксперимент Ньютона показывает абсолютное ускорение, и это все, что он когда-либо предполагал показать. Дальнейший аргумент, представленный тем же критиком, основан на тангенциальной силе, которая, по его утверждению, действует на вращающиеся частицы воды. Он надеется таким образом объяснить центробежную силу, не вводя понятие абсолютного вращения. Это рассуждение настолько неясно, что мы не претендуем на его понимание, но одно совершенно точно — исходные посылки совершенно неверны, поскольку на равномерно вращающиеся частицы воды не действует никакая тангенциальная сила, и в этом случае проявляется центробежная сила. Очевидно, Беркли путает импульс и силу.

Другие критики высказывали предположения о возможности вращения нашего пространства в более обширном пространстве, а этого — в еще более обширном и т. д. Но что, если это так? Гипотеза такого рода никогда не поставит под угрозу позицию Ньютона. Допустим, для примера, что наша вселенная пространства подобна пузырю эфира, вращающемуся в сверхпространстве; этот пузырь эфира все равно будет представлять собой абсолютное пространство. В любом случае, существенная особенность абсолютного пространства и движения заключается в эмпирическом факте, что в природе, по-видимому, присутствует определенный набор динамических осей; и вышеупомянутый аргумент никогда не сможет опровергнуть существование этих абсолютных осей. Все, что он может сделать, — это доказать, что о движении этих осей в сверхпространстве ничего нельзя сказать. Но в любом случае оси не будут вращаться в пузыре эфира. Таким образом, это означало бы признание положения абсолютного пространства, как его понимает наука, и мы должны были бы представить себе более обширное пространство, вращающееся вокруг него. Разумеется, вся эта спекуляция крайне ненаучна, поскольку сводится к гипотезе *ad hoc*, не поддающейся экспериментальной проверке, созданной с единственной целью усложнить координацию фактов; тогда как единственное возможное оправдание для гипотезы такого рода заключается в том, чтобы позволить нам упростить нашу координацию.

Мы можем упомянуть еще один тип аргументации, поскольку он выявляет важный момент терминологии. Например, утверждается, что ускорение должно быть относительным, поскольку мы измеряем его относительно инерциальной системы отсчета или пространства. Но здесь, конечно, мы имеем дело с простой путаницей слов. Критик предполагает, что абсолютное движение должно означать *движение по отношению к ничему*. Но абсолютное движение в науке вовсе не означает этого. Оно означает движение, которое не может рассматриваться как *относительное по отношению к чему-либо наблюдаемому*, например к материи; следовательно, оно автоматически становится движением *по отношению к чему-то сверхчувственному, то есть к пространству*. Если бы не эта интерпретация абсолютного движения в науке, это выражение стало бы бессмысленным, поскольку движение по отношению к ничему само по себе является ничем.

Мы можем резюмировать научное отношение к пространству и движению следующим образом: если движение может быть обнаружено иначе, чем по отношению к наблюдаемым вещам, или, точнее, если сопоставление научных фактов упрощает предположение, что это так, то движение, а следовательно, и пространство, должны считаться абсолютными. Если, с другой стороны, никаких следов абсолютного движения, как оно определено выше, не может быть обнаружено экспериментально, то перед нами открываются два пути. Либо мы можем предположить, что абсолютное движение не имеет научного значения и что движение всегда является движением между наблюдаемыми объектами, и в этом случае

движение и пространство считаются относительными; либо мы можем следовать методу Лоренца в отношении эфира и утверждать, что абсолютное движение было бы обнаружено, если бы не ряд компенсирующих физических эффектов, которые просто скрывают его присутствие от наших экспериментов. Но если мы примем эту весьма искусственную позицию, то нам необходимо будет следовать аргументации Лоренца и успешно определить точный механизм действия этих компенсирующих эффектов, а также их точные численные величины — а это потребует значительных знаний в области высшей математики. Вот и все, что касается научного статуса проблемы пространства и движения.

Метафизики имеют привычку путать этот научный аспект абсолютности или относительности движения и пространства с другой проблемой, касающейся *сущности* пространства. Но, как указал Эйлер два века назад в цитированном выше отрывке, эта метафизическая проблема имеет совершенно иной характер и не имеет никакого отношения к той, которую обсуждают ученые. Даже если бы мы были готовы придать какое-либо значение таким метафизическим изобретениям, как монады Лейбница, и согласились бы с тем, что пространство можно рассматривать как результат взаимоотношений между ними, — даже в этом случае, с учетом динамических фактов, подчеркнутых Ньютоном, движение и пространство все равно оставались бы абсолютными. Было бы бесполезно утверждать, что движение относительно, поскольку оно относительно по отношению к монадам, поскольку они, будь то вымышленные или реальные, в любом случае сверхчувственные. И наоборот, даже если бы мы приняли утверждение метафизиков о том, что, с метафизической точки зрения, пространство является абсолютным существом, тем не менее, если бы было невозможно обнаружить какие-либо следы абсолютного движения, мы должны были бы сказать, что движение и пространство являются научно относительными, или же следовать методу Лоренца в отношении эфира.

Если в дополнение ко всем этим фактам мы вспомним, что теории метафизиков сводятся к простым выражениям мнения, не дающим возможности доказать или опровергнуть их, то мы можем хорошо понять, что научное отношение к пространству и движению определяется исключительно эмпирическими данными.

И теперь естественно возникает вопрос: если динамические факты движения навязывают веру в абсолютное вращение, как же Эйнштейн, и даже до него Мах, могли считать возможным уйти от решения Ньютона? Рассмотрим сначала аргументы Маха. Цель Маха состояла в том, чтобы скоординировать динамические факты движения исключительно с помощью чувственных факторов и таким образом избежать введения сверхчувственной сущности, абсолютного пространства. Итак, он пришел к представлению о вращении как о вращении по отношению к Вселенной, а значит, по отношению к звездам. Однако, в отличие от Беркли, Мах осознавал большую трудность объяснения центробежных сил с этой точки зрения. По крайней мере, он предпринял попытку решить эту загадку, приписав прямое динамическое влияние относительному вращению звездных масс. Но поскольку его попытка не была подкреплена математически, она осталась не более чем необоснованным предположением. Дело в том, что в физической науке убедительными являются только те теории, которые мы можем защитить с помощью количественных аргументов; простые неразработанные догадки не имеют никакой ценности.

Даже Ньютон спекулировал на причине гравитации, приписывая ее какому-то виду давления эфира, но, несмотря на его прославленное имя, эти идеи даже не были упомянуты последующими учеными. Почему? Потому что они не поддавались количественному

анализу и были настолько расплывчатыми, что оказались бесполезными. То же самое происходит, когда мы рассматриваем гипотезы, выдвинутые для объяснения происхождения Солнечной системы: мы обнаруживаем, что их чрезвычайно много и они очень разнообразны. Но ни одна из них не имела никакого веса, пока не была подвергнута математическому исследованию, и только после этого, в зависимости от полученных результатов, была признана возможной или невозможной. И именно эта математическая работа является сутью трудности, требующей гениальности Лапласа или Пуанкаре. Точно так же мы можем предположить, что последовательность простых чисел в конечном итоге будет включена в лаконичную математическую формулу или что когда-нибудь будет установлена межпланетная связь. Сложность заключается не в предположении, не в желании, а в его реализации. На самом деле, сомнительно, что беспорядочные догадки когда-либо приносили пользу науке. Идея Жюль Верна о кораблях, путешествующих под водой, вряд ли может считаться вкладом в изобретение подводных лодок, так же как и его рассказ о путешествии на Луну не помог нам ступить на поверхность нашего спутника. Если взять более научный пример, то догадка Демокрита об атомах, безусловно, ни на час не приблизила их открытие.^[149]

То же самое можно сказать и о догадке Маха (ее трудно назвать иначе). Действительно, в дни Маха было совершенно невозможно обосновать его идею, поскольку необходимый материал, *то есть* пространство-время, тогда был неизвестен. Когда мы осознаем важную роль, которую играет пространство-время в наших попытках избежать веры в абсолютное вращение, мы можем хорошо понять, что доктрина относительности всех движений была бы абсурдна в дни Ньютона. Фактически, любой мыслитель до, скажем, 1900 года никогда не мог предвидеть открытие пространства-времени, поскольку его единственное обоснование возникло из отрицательных экспериментов в оптике и электродинамике, предпринятых примерно в то же время. Что касается Ньютона, то он не только ничего не знал о немеханических отрицательных экспериментах, но и уравнения электродинамики в его время еще не были открыты. Более того, даже если бы он и придумал пространство-время благодаря какому-то божественному вдохновению, он никогда не смог бы использовать его для установления относительности всех движений. Его незнание неевклидовой геометрии сделало бы эту задачу невозможной. Фактически, пространство-время в XVII веке было бы помехой, и единственным результатом его преждевременного введения в науку было бы все запутать и сделать открытие закона всемирного тяготения Ньютона практически невозможным.

И это подводит нас к еще одному моменту, который часто встречается в физической науке. Преждевременные открытия чаще приносят больше вреда, чем пользы. Например, если бы астрономы XVII века обладали более совершенными телескопами (), если бы они признали, что планеты (в частности, Меркурий) не подчиняются законам Кеплера в строгой форме, закон Ньютона, возможно, никогда бы не был открыт. В любом случае, его правильность была бы подвергнута серьезному сомнению, и математики могли бы потерять мужество и усомниться в своей способности открывать законы природы. Например, Леверрье мог бы не иметь необходимой уверенности, чтобы провести свои длительные вычисления, приведшие к открытию Нептуна. Короче говоря, физическая наука развивается путем последовательных приближений, и слишком быстрые скачки в накоплении знаний могут привести к катастрофическим последствиям.

Теперь мы можем шаг за шагом проследить исследования Эйнштейна и увидеть, как абсолютное вращение Ньютона постепенно исчезло из науки. Ситуация, с которой столкнулся Эйнштейн, несколько отличалась от той, с которой столкнулся Ньютон. Во времена Ньютона не было *априорных* причин, по которым движение в пустом пространстве

следовало считать абсолютным, а не относительным. Поэтому любой результат эксперимента был бы одинаково приемлем. Но когда речь шла о движении в эфире, были все основания предполагать, что оно не может быть бессмысленным. Дело в том, что эфир, по-видимому, обладал свойствами упругой материальной среды, поэтому было трудно предвидеть заметную разницу между движением через эфир и движением через материю. Еще более важно то, что уравнения электромагнетизма доказывали, что явления должны зависеть от движения через эфир. Отсюда следовало, что при проведении отрицательных экспериментов в электродинамике были все основания предполагать, что будет обнаружена абсолютная скорость через эфир. Если бы это было так, то неподвижный эфир, по всей вероятности, был бы отождествлен с абсолютным пространством Ньютона. И можно было бы утверждать, что абсолютная скорость, которая всегда ускользала от механического обнаружения, наконец была выявлена с помощью электромагнитных и оптических испытаний.

Однако, как мы знаем, абсолютная скорость, даже через эфир, упорно отказывалась проявляться. Ситуация была схожа с той, о которой мы упоминали при обсуждении пространства. Там также абсолютная скорость в пространстве, казалось, ускользала от нас, несмотря на то, что в силу абсолютного характера вращения пространство не могло не быть абсолютным. Но в случае пространства эта двойственность, вытекающая из ньютоновского принципа относительности, была сразу же объяснена математической формой уравнений механики. Фундаментальный закон механики, гласящий, что сила равна массе, умноженной на ускорение, не упоминает скорость; следовательно, абсолютная скорость явно не имеет отношения к механическим процессам. В случае эфира неуловимость скорости была гораздо более тревожной; среди прочих причин, потому что уравнения электромагнетизма содержали скорость в явном виде в виде электрического тока.

Итак, когда была учтена предполагаемая полуматериальная природа эфира и когда было рассмотрено отсутствие ковариации уравнений электромагнетизма, путь наименьшего сопротивления, очевидно, подсказывал, что мы должны предположить, что скорость в эфире является реальностью, но что ее эффекты скрыты компенсирующими влияниями. В любом случае, не стоит удивляться, что хронологически это было первое рассмотренное положение. Как мы помним, его отстаивал Лоренц. Но когда Лоренцу удалось объяснить отрицательные эксперименты с этой точки зрения, его теория показалась настолько явно искусственной, что ученые поняли, что где-то что-то не так.

Если, следуя Эйнштейну, мы примем очень общую позицию, не обращая внимания на причины и следствия, и сосредоточимся исключительно на том, что показали эксперименты, то нас не может не поразить следующий факт: каждый раз, когда мы пытались обнаружить абсолютную скорость, будь то в пространстве или в эфире, наши попытки заканчивались неудачей. Даже некоторые классические ученые, опираясь исключительно на механические эксперименты, были вынуждены отказаться от мысли, что абсолютная скорость в пространстве имеет какой-либо смысл. Насколько сильнее было подозрение, что здесь задействован какой-то общий принцип, когда мы снова столкнулись с той же ситуацией в случае с эфиром! В этих условиях трудно сказать, что Эйнштейн пошел по очень революционному пути, когда он постулировал свой *специальный принцип относительности*, утверждая, что *абсолютная скорость* в пространстве или эфире является бессмысленным понятием. Поступая так, он просто абстрактно сформулировал результат эксперимента. Специальный принцип Эйнштейна можно выразить следующим образом:

«Ни один эксперимент, независимо от его характера, будь то механический, оптический или электромагнитный, никогда не позволит нам определить нашу абсолютную скорость в пространстве или эфире».

Мы видим, что единственное различие между принципом Эйнштейна и принципом относительности Ньютона заключается в том, что отныне относительность скорости действует для всех видов экспериментов, или, опять же, что эфир и пространство отождествляются. Помимо этого различия, ничего не изменилось. Как и раньше, пространство или эфир *остаются абсолютными* в том смысле, что, хотя они и являются относительными для скорости, они все же проявляют себя как абсолютные для ускоренных или вращательных движений, точно так же, как и во времена Ньютона.

Вопреки позиции Эйнштейна, метафизик может возразить против отбрасывания абсолютной скорости как бессмысленной, просто потому, что, по-видимому, ни один эксперимент не способен доказать ее существование. Но наука, как мы знаем, не является метафизикой; она основана на опыте. *Априорное* отвержение абсолютной скорости было бы грехом против научного метода; но абсолютная скорость, которая, хотя и предположительно присутствует, не может быть обнаружена никаким экспериментом и для которой, кроме того, не может быть найдена никакая полезная функция, не играет никакой роли в работе природы. Если бы будущие эксперименты обнаружили эту абсолютную скорость, ее, конечно, пришлось бы вновь ввести; но сохранять ее на основе общих принципов вопреки вердикту эксперимента было бы очень плохой наукой.

Мы должны быть осторожны, чтобы не путать нынешнюю ситуацию, например, с ситуацией, связанной с атомизмом. Даже сегодня мы едва ли можем сказать, что атомы были наблюдаемы в том же смысле, в каком наблюдались камни и столы; тем не менее, большинство ученых признали существование атомов много лет назад, потому что, постулируя их наличие, можно было с легкостью скоординировать ряд явлений. Таким образом, хотя атомы и ускользали от прямого обнаружения, они были необходимы для косвенных математических рассуждений. Ничего подобного не наблюдается в случае абсолютной скорости. Мы настаиваем на этом моменте, потому что иногда считается, что теория относительности является по сути феноменологической. В широком смысле это верно, но это совершенно неверно, если под феноменализмом мы понимаем это слово в его более узком смысле. Истинный феноменолог, такой как Мах, зашел бы так далеко, что отрицал бы существование атомов только потому, что они никогда не наблюдались человеческим глазом, независимо от того, было ли полезно представлять их себе для согласования эмпирических фактов. Это не является позицией науки. Но если под феноменализмом мы подразумеваем стремление освободить наше понимание вещей от ненужных метафизических понятий, которые никоим образом не требуются экспериментом, то мы, несомненно, вправе утверждать, что не только теория относительности, но и сама современная наука по сути своей феноменологична. Если эти моменты ясно поняты, мы видим, почему Эйнштейн счел необходимым избавить физику от абсолютной скорости. Короче говоря, исключение абсолютной скорости из науки, по-видимому, диктуется экспериментом; и единственный путь, который можно избрать, — это логически продолжить эту линию рассуждений и посмотреть, к чему она нас приведет.

Мы помним, что относительность скорости в сочетании с уравнениями электромагнетизма указывала на неизменность скорости света *в вакууме*, измеренной в любой галилеевой системе отсчета (). Отсюда с математической логикой следовали преобразования Лоренца-Эйнштейна. Именно эти преобразования, как мы знаем, влекут за собой относительность длительности, длины и одновременности. Поэтому мы не можем рассматривать новые понятия как результат каких-то несбыточных мечтаний или божественного вдохновения; они были навязаны Эйнштейну его уравнениями преобразования, а те, в свою очередь, были выведены из исходных принципов, а значит, из сверхточных экспериментов. Разумеется, было бы весьма произвольно и, по сути, абсурдно

устанавливать специальный принцип относительности до того, как нас к этому подтолкнули отрицательные результаты экспериментов. Действовать на основании какого-то божественного вдохновения до получения результатов экспериментов означало бы пуститься в бессмысленную погоню. Здесь нельзя не подчеркнуть, что вера в относительность скорости *движения через эфир* не навязывается *априори*; скорее наоборот. Иными словами, нет *априорной* причины, по которой уравнения электромагнетизма должны сохранять ту же форму независимо от скорости нашей системы отсчета. Мы можем симпатизировать той или иной доктрине, но в конечном счете только эксперимент и только эксперимент может направлять науку в таких вопросах.

Важно понимать, что на этом этапе Эйнштейн открыл только преобразования Лоренца-Эйнштейна вместе с их неизбежными релятивистскими последствиями. В его трудах нет ни малейшего намека на мир пространства-времени. Это великое открытие принадлежит математику Минковскому, который в 1908 году доказал, что преобразования Лоренца-Эйнштейна подразумевают существование четырехмерного пространственно-временного континуума событий. С тех пор концепции классической науки, пространство точек и время мгновений, рассматриваемые сами по себе, ушли в тень. И в этом случае открытие Минковского было чисто математическим. Оно было результатом простого применения теории групп, и в его работе не найти и следа философских предрассудков.

Короче говоря, именно математические уравнения, а значит, и сверхточные эксперименты, сделали неизбежным появление нового взгляда на мир. Как говорит сам Минковский в своей инаугурационной речи: «Представления о пространстве и времени, которые я хочу изложить вам, возникли на почве экспериментальной физики, и в этом заключается их сила». Что же касается пространства-времени, этого объединенного континуума, то оно никогда даже не упоминалось в спекуляциях ни ученых, ни философов. Для самого Эйнштейна открытие четырехмерного пространства-времени, вероятно, было столь же неожиданным, как и для всего мира в целом, но нельзя было отрицать правильность аргументов Минковского, которые мог проверить любой, имеющий элементарные знания по математике. Таким образом, хотя пространство-время представляет собой одну из самых поразительных философских революций, когда-либо наблюдавшихся, тем не менее, процедура, которая привела к его открытию, сводится к обычному математическому обращению с эмпирическими фактами, полученными экспериментаторами.

Давайте рассмотрим, какое влияние эти новые идеи окажут на абсолютное пространство и движение Ньютона. Конечно, для начала, поскольку пространство-время заменяет отдельное пространство и время, наше мировоззрение значительно изменяется. Оно изменяется в том смысле, что расстояние, продолжительность и одновременность больше не являются абсолютными. Однако, если мы рассматриваем проблему пространства с точки зрения движения, этого краеугольного камня ньютоновской синтеза, мы обнаруживаем очень небольшие изменения.

Те же динамические факты, которые заставили Ньютона признать вращательное движение абсолютным, привели Эйнштейна к тому же выводу. Таким образом, так же как Ньютон, рассуждая с точки зрения пространства, был вынужден принять абсолютное пространство, так и Эйнштейн, рассуждая с точки зрения пространства-времени, был вынужден принять абсолютное пространство-время. Короче говоря, независимо от того, рассуждаем ли мы с точки зрения пространства или пространства-времени, динамические факты движения, по-видимому, навязывают абсолютный фон в обоих случаях.

Однако даже если мы ограничимся проблемой движения, абсолютное пространство-время имеет большое преимущество перед ньютоновским абсолютным пространством. В случае абсолютного пространства трудность заключалась в том, чтобы объяснить неуловимость, относительность или мифический характер скорости в пустом пространстве (воплощенный в ньютоновском принципе относительности). Но с абсолютным пространством-временем эта трудность преодолена. Абсолютное пространство-время, хотя и требует абсолютной природы вращения и ускорения, с такой же неизбежностью требует относительности скорости. Таким образом, введение пространства-времени послужило устранению той неприятной дуалистической особенности, которая была характерна для пространства Ньютона. Из всего этого мы видим, что фундаментальная характеристика ньютоновского синтеза, а именно наличие сверхчувствительной абсолютной системы отсчета, по отношению к которой измерялись бы вращение и ускорение (инерциальная система отсчета), осталась неизменной. Оправдание идей Маха казалось столь же отдаленным, как и прежде.

Эйнштейн следующими словами резюмирует ситуацию, которая сложилась до разработки общей теории:

«В частности, принцип инерции, кажется, заставляет нас приписывать пространственно-временному континууму физически объективные свойства. Так же как с точки зрения Ньютона было необходимо сделать оба утверждения, *tempus est absolutum, spatium est absolutum*, так и с точки зрения специальной теории относительности мы должны сказать, *continuum spatii et temporis est absolutum*. В последнем утверждении *absolutum* означает не только «физически реальное», но и «независимое в своих физических свойствах», имеющее физический эффект, но не подверженное влиянию физических условий.

«До тех пор, пока принцип инерции считается краеугольным камнем физики, эта точка зрения, безусловно, является единственной оправданной» ([\[150\]](#)).

Теперь, когда стало ясно, что реальный мир представляет собой плоское четырехмерное абсолютное пространство-время, а не отдельное пространство и время, возникла необходимость привести законы природы в соответствие с новой моделью. Законы электродинамики легко вписались в эту модель, и это было вполне естественно, поскольку пространство-время было сформировано именно на основе этих законов. Затем Эйнштейну удалось модифицировать законы механики, сделав их совместимыми с пространством-временем. Однако оставался еще самый важный закон — закон гравитации (). Этот закон, сформулированный Ньютоном, был несовместим с пространством-временем, поэтому следующим шагом было соответствующее изменение закона Ньютона. Пуанкаре занялся этой проблемой и в 1906 году нашел решение. Дальнейшие попытки были предприняты Абрахамом, Ми и Нордстромом () [\[151\]](#).

Но все эти попытки вскоре были затменены блестящим обобщением самого Эйнштейна. Ему удалось установить долгожданное слияние механики и гравитации, получив тем самым самую прекрасную теорию, известную науке. Однако, прежде чем следовать за Эйнштейном в его решении, мы можем заявить, что Пуанкаре еще в 1906 году удалось установить один очень важный момент.[\[152\]](#) До его исследований считалось, что закон гравитации Ньютона представляет собой весомый аргумент против теории пространства-времени. Ведь, согласно Лапласу, считалось, что наблюдаемые движения планет требуют, чтобы гравитация распространялась со скоростью, во много раз превышающей скорость света, что трудно согласовать с максимальной скоростью, требуемой теорией относительности. Однако Пуанкаре доказал, что сила гравитации вполне может распространяться со скоростью света и при этом давать законы движения планет, практически идентичные законам Кеплера. Он

приступил к рассмотрению различных возможных законов гравитации, совместимых с теорией плоского пространства-времени, хотя и сводящихся к закону Ньютона для малых скоростей. Один из этих законов, в частности, был признан объясняющим прецессионное опережение перигелия Меркурия.

Значение этих открытий заключалось в том, что они доказали, что теория относительности не имеет ничего общего с явлением гравитации. Но был установлен еще более важный момент. Если бы утверждение Лапласа было верным, если бы гравитация действительно распространялась мгновенно по всему пространству, то мы столкнулись бы с гравитационным *воздействием на расстоянии*, что было бы весьма неприятной концепцией. Ньютон был противник действия на расстоянии, но нельзя отрицать, что его закон гравитации был прямым призывом к нему. С другой стороны, если бы гравитация распространялась с конечной скоростью, мы могли бы представить ее как непрерывное действие через среду, подобное действию электромагнитных сил. Тогда гравитация могла бы быть связана с методами физики поля, введенными Фарадеем и Максвеллом. Сегодня эти исследования Пуанкаре представляют лишь исторический интерес, поскольку они были затменены блестящим решением Эйнштейна проблемы гравитации, которое стало возможным благодаря введению переменной кривизны пространства-времени. Тем не менее, следует отметить, что даже если бы общая теория Эйнштейна была отвергнута в результате какого-либо решающего эксперимента, все равно можно было бы сохранить специальную теорию плоского пространства-времени, взяв закон гравитации, данный Пуанкаре или Нордстромом. Однако, как мы увидим, специальная теория подводит нас к общей теории столь разнообразными способами, что нет оснований опасаться, что наука понесет серьезный ущерб, который повлекло бы за собой возвращение к плоскому пространству-времени в нашем понимании единства природы.

Давайте теперь проследим за последующими открытиями и посмотрим, как Эйнштейн был вынужден отказаться от идеи жестко плоского абсолютного пространства-времени, действующего как контейнер для материи, но никоим образом не изменяемого присутствием материи. По его собственному признанию, это важное открытие было сделано по крайней мере тремя различными путями рассуждений. Мы рассмотрим эти рассуждения по отдельности, поскольку они проливают интересный свет на методологию теории.

Во-первых, Эйнштейн заметил, что пространственные измерения, проводимые на поверхности диска (вращающегося в плоском пространстве-времени), обязательно дадут неевклидовы результаты, поскольку из-за сокращения Фитцджеральда один и тот же стержень, расположенный радиально или поперечно, будет иметь разную длину. Но во вращающейся системе отсчета действуют силы инерции; поэтому было высказано предположение, что силы инерции связаны с неевклидовостью пространства (а не пространства-времени) системы отсчета, в которой действуют эти силы. Позже мы увидим, как это открытие будет использоваться. Между прочим, отметим, что этот первый результат вытекает как математическая необходимость из специальной теории; никаких новых допущений не вводилось. Геометрически это означает, что наблюдатель на вращающемся диске разделяет плоское пространство-время на искривленное пространство и искривленное время.

Теперь перейдем ко второму шагу. Наиболее точные физические эксперименты установили тождество двух типов масс: инерционной и гравитационной. Классическая наука считала это тождество случайным или, по крайней мере, необъяснимым. Эйнштейн предположил, что мы имеем дело с фактом, имеющим очень большое значение в природе, фактом, который необходимо учитывать при любой теоретической координации знаний. Если проанализировать причины такого отношения Эйнштейна, то мы обнаружим, что они

сводятся к нежеланию верить, что идентичность такого рода может быть простой случайностью. Точно так же, если бы два человека опубликовали одну и ту же книгу, идентичную слово в слово, вероятность подсказывала бы, что один из них скопировал работу другого. Если мы принимаем идентичность двух масс как нечто большее, чем простое совпадение, мы должны предположить, что большее сходство между силами инерции и гравитации обусловлено тем, что эти два типа сил по сути одинаковы. Но мы видели, что в областях пустого пространства, где действовали силы инерции, пространство (хотя и не пространство-время) было неевклидовым. Отсюда следует, что в гравитационном поле вблизи материи пространство также должно быть неевклидовым. Но между распределением сил инерции и сил гравитации есть заметная разница. Силы инерции, возникающие вдали от материи, могут быть компенсированы изменением движения наблюдателя. Таким образом, центробежная сила на диске может быть сведена к нулю; все, что нам нужно сделать, это остановить вращение диска, а значит, и наблюдателя. С другой стороны, мы не можем избавиться от силы гравитации. Верно, что в падающем лифте сила притяжения исчезла бы в результате движения лифта; и мы больше не могли бы ее ощущать, падая, как и положено, вместе с лифтом (благодаря тождественности двух масс). Но мы знаем, что если бы лифт был достаточно длинным, сила притяжения вновь появилась бы в отдаленных местах из-за радиального распределения гравитационного поля вокруг Земли. Итак, мы должны сделать вывод, что в случае гравитационного поля, создаваемого материей, неевклидовость пространства больше не может быть устранена путем простого изменения нашего движения, а значит, путем простого изменения нашего метода разделения пространства-времени на наше личное пространство и время. Отсюда следует, что неевклидовость пространства, присутствующая в гравитационном поле, должна происходить из более глубокого источника. В частности, она должна возникать из внутренней неевклидовости *пространства-времени*, окружающего материю, поскольку только искривленное неевклидово пространство-время никогда не может быть разделено на плоское пространство и плоское время. Итак, мы видим, что вокруг масс пространство-время больше не может быть плоским, как в областях, удаленных от материи. Становится очевидной тесная связь между присутствием материи и неевклидовостью пространства-времени. Материя и, в более общем смысле, энергия приводят к искривлению пространства-времени.

И здесь мы должны отметить важное различие между двумя аргументами, которые мы представили до сих пор. В первом случае, касающемся вращающейся системы отсчета или диска, аргумент был, так сказать, неопровержимым: он был навязан как прямое математическое следствие преобразований Лоренца-Эйнштейна. Но второй аргумент, касающийся тождества двух типов масс, был основан на экспериментальном факте. Когда мы рассматриваем замечательные открытия, которые были сделаны Эйнштейном на основе этой идентичности двух масс, нам может показаться странным, что Ньютон или какой-либо другой ученый не придали этому теоретического значения. Конечно, причина, по которой Ньютон не стал рассматривать этот вопрос, легко понятна, если вспомнить, что он игнорировал пространство-время. Только с помощью пространства-времени в сочетании со знанием неевклидовой геометрии можно было понять полное значение этой идентичности. Однако это оправдание не может быть принято для тех ученых, которые в 1908 году были так же хорошо знакомы со специальной теорией, как и сам Эйнштейн. Почему прошло три долгих года между открытием пространства-времени в 1908 году и идентификацией Эйнштейном двух типов масс в 1911 году? Это подводит нас к другой теме обсуждения.

Мы пытались объяснить, что координация теоретических физиков основана в первую очередь на экспериментальных фактах, а не на несбыточных мечтах. Но если согласиться с этим, то гениальность отдельного ученого заключается в том, чтобы выделить те

конкретные факты, которые, по его мнению, приведут к наиболее интересным последствиям. То, что Эйнштейн выделил эту идентичность двух масс, в то время как никто другой об этом не подумал, является данью уважения гению Эйнштейна; и это все, что можно сказать. Утверждается, что эта идея пришла ему в голову внезапно, когда он, идя по улице, увидел человека, упавшего с крыши дома. Говорят, что этот инцидент привлек его внимание к условиям наблюдения, которые будут действовать для свободно падающего наблюдателя, находящегося в состоянии покоя (). Эта история напоминает историю с яблоком Ньютона. В любом случае, независимо от того, как Эйнштейн пришел к мысли об идентичности двух масс, важно то, что эта идентичность представляет собой экспериментальный факт — факт, который до того момента казался чудесным совпадением. Уже по этой причине можно было заподозрить, что за этим удивительным совпадением скрывается что-то важное в природе, чего мы еще не поняли.

Возвращаясь к мотивам, которые побудили Эйнштейна заподозрить, что материя должна изменять структуру пространства-времени, мы видим, что они были совершенно иного характера. Аргумент о вращающемся диске был исключительно математическим; эквивалентность двух масс основывалась на факте опыта. Ни один из этих двух аргументов не был предложен философией, теософией или теологией. Поэтому утверждение, что Эйнштейн находился под влиянием философии Декарта, Лейбница, г-жи Блаватской или кого-либо еще, свидетельствует о весьма слабом знании научного метода. Хотя новые взгляды влекут за собой заметные изменения в нашем понимании взаимосвязи между протяженностью и материей, в подходе Эйнштейна нет безответственных догадок. В частности, нет никакого желания навязывать какую-то особую философию, формирующую материю. Если теория и движется в сторону определенных философских выводов, то она движется по течению, а течение представляет собой рациональную координацию фактов опыта.

Теперь мы подошли к третьему аргументу, выдвинутому Эйнштейном в пользу его теории пространства-времени, изменяющего материю. Мы оставили его на последнее место, поскольку он более философский, чем два предыдущих. Мы можем сжать его в утверждение, что там, где есть действие, должно быть и противодействие. Теперь, в жестко плоском пространстве-времени, траектории свободных тел должны быть представлены как направленные геометрией или структурой пространства-времени. Следовательно, существует воздействие структуры пространства-времени на тела. Но тогда должно существовать и обратное воздействие тел на структуру. Подобным образом, электрон воздействует на электромагнитное поле, а поле, в свою очередь, воздействует на электрон. Эйнштейн выражает свое неприятие концепции, которая противоречит взаимности воздействия, следующими словами:

«Во-первых, представление о вещи (пространственно-временном континууме), которая сама действует, но на которую нельзя воздействовать, противоречит научному мышлению. Именно по этой причине Э. Мах предпринял попытку исключить пространство как активную причину в системе механики. По его мнению, материальная частица движется не в необуслованном движении относительно пространства, а относительно центра всех других масс во Вселенной; таким образом, цепочка причин механических явлений была замкнута, в отличие от механики Ньютона и Галилея. Чтобы развить эту идею в рамках современной теории действия через среду, свойства пространственно-временного континуума, определяющие инерцию, должны рассматриваться как полевые свойства пространства, аналогичные электромагнитному полю. Концепции классической механики, основанные на принципе « », не дают возможности выразить это. По этой причине попытка Маха найти решение пока что не увенчалась успехом».

Если мы проанализируем текущее положение теории, то можем резюмировать его следующим образом: пространство-время — это в первую очередь абсолютное четырехмерное континуум событий. В отсутствие материи и энергии его структура плоская. При наличии материи плоская структура слегка изгибается как вокруг материи, так и внутри нее. Однако изгиб чрезвычайно незначительный. Хотя оно достаточно для объяснения гравитации, оно слишком незначительно, чтобы его можно было обнаружить с помощью прямых измерений с помощью стержней (это верно, по крайней мере, в случае пространства вокруг Солнца). Возмущения структуры, вызванные внезапным появлением или прохождением материи, распространяются от места к месту со скоростью света, так что гравитация проявляется как непрерывное действие через среду, точно так же, как действие электромагнитного поля. Таким образом, действие на расстоянии исключается.

И теперь, какое отношение имеют эти открытия к проблеме абсолютного вращения и абсолютного пространства-времени? Мы видим, что пространство-время, слегка уступая под воздействием материи, утратило ту абсолютную жесткость, которая характеризовала пространство Ньютона. Из-за этих различных искажений пространственно-временного фона, вызванных изменениями в распределении материи, скорость вращения тела страдает от определенной степени неопределенности. В этой степени вращение больше не является абсолютным.^[153] Но когда мы просматриваем последовательность выводов, которые привели нас к этому частичному отказу от веры Ньютона в абсолютное вращение, мы видим, что наши открытия стали возможными только благодаря пространству-времени. Если бы пространство-время никогда не было открыто, если бы мы остались довольны разделением пространства и времени, было бы совершенно невозможно установить эту неопределенность вращения, *поскольку было бы невозможно объяснить гравитацию только с помощью изменений в структуре пространства*. В результате пространственный фон остался бы жестким, и позиция Ньютона осталась бы неизменной.

Даже сейчас, несмотря на открытие колеблющегося пространственно-временного фона, абсолютная природа вращения не была полностью опровергнута. Ведь в пустой вселенной пространство-время по-прежнему сохраняло бы четко определенную жесткую структуру; следовательно, если мы представим себе одно единственное тело, введенное в этот иначе пустой мир, абсолютное вращение этого тела всегда можно было бы обнаружить. Оно было бы выдано центробежными силами, которые возникали бы из-за того, что частицы тела следовали бы мировым линиям, отклоняющимся от геодезических линий, или линий наименьшего сопротивления, структуры пространства-времени. По этой причине вращение по-прежнему было бы абсолютным, поскольку оно сохраняло бы реальное значение в мире, лишенном материи. Короче говоря, оно не имело бы ничего общего с вращением относительно звездных масс. Очевидно, что мы еще далеки от того, чтобы оправдать механику Маха.

Но если учесть, что теория Эйнштейна основана на относительности скорости, а затем устанавливает, по крайней мере частично, относительность ускорения, то нельзя отрицать, что логическим продолжением ее триумфа было бы успешное установление полной относительности всех движений и инерции. Хотя Эйнштейн никогда не скрывает своей надежды, что это будет конечным результатом, он не стремится форсировать события в нарушение фактов.

Однако может быть интересно выяснить, какие изменения в теории потребуются для установления относительности всех видов движения и инерции. Поскольку именно внутреннее строение пространства-времени, сохраняющееся даже в отсутствие материи, ответственно за центробежную силу в пустом мире, а значит, за абсолютное вращение и инерцию, подтверждение идей Маха повлекло бы за собой следующее условие: Необходимо было бы предположить, что в отсутствие всякой материи пространство-время утратило бы всякие следы структуры и стало бы аморфным. Другими словами, материя должна была бы создавать пространство-время () и его структуру (т. е. распределение (g_{ik}) или метрическое поле), а не просто локально изменять уже существующую структуру. Интересно отметить, что относительность вращения приводит нас к концепции пространства, которую нельзя было предвидеть *априори*. Сам Мах, защищая относительность движения, по-видимому, не осознавал, что отказ от абсолютного пространства Ньютона повлечет за собой создание вселенной, созданной материей.

9ik Теперь Эйнштейн доказал, что математически возможно представить вселенную, в которой вся структура пространства-времени (а значит, и все распределение Эйнштейна-Метрика, или метрическое поле) будет обусловлена материей. Это, как мы знаем,

цилиндрическая вселенная. Но и здесь мы должны помнить, что он никогда не просил нас принять эту цилиндрическую вселенную только потому, что она предполагает относительность инерции и вращения. Как бы ни привлекала нас относительность всех движений, в конечном счете она сводится к простой философской фантазии, и прежде чем ее можно будет принять, необходимо представить более веские аргументы.

Такие аргументы появились, когда гравитационные уравнения были изучены более внимательно. Было видно, что они влекут за собой те особые силы, которые относительность вращения Маха заставляет нас приписывать звездам. Помимо этих мотивов, Эйнштейн руководствовался желанием избежать концепции постепенно обедняющейся ядерной вселенной звезд. Когда, кроме того, были приняты во внимание низкие скорости звезд, он вновь оказался вынужденным обратиться к цилиндрической вселенной. Кроме того, мы можем вспомнить, что возможность свести материю к электричеству и гравитации требует той же цилиндрической вселенной.

Принимая во внимание все эти факты, можно понять, что конечная вселенная, влекущая за собой относительность вращения, имеет под собой прочную основу. Мы не говорим, что идея Маха оправдана, поскольку цилиндрическая вселенная вытекает из стабильности распределения звезд, а это может быть ошибочной предпосылкой. Все, что утверждается, это то, что полная относительность движения математически возможна, что никогда не было доказано ни Махом, ни кем-либо другим. Действительно, как мы уже сказали, Эйнштейн не настаивает на том, чтобы мы приняли цилиндрическую вселенную. Он прямо заявляет, что теория относительности не требует этого как неизбежной необходимости; она лишь предлагает это как возможность. Если мы предположим, что наша звездная вселенная сконцентрирована в ядре, окруженном бесконечным пространством, то квазииневклидова бесконечная вселенная должна занять место цилиндрической. В этой альтернативной вселенной материя по-прежнему локально изменяет пространство-время, но никогда не может создать его *в целом*. Как говорит Эйнштейн: «Если бы вселенная была квазииневклидовой, то Мах был бы полностью неправ в своем предположении, что инерция, как и гравитация, зависит от своего рода взаимного действия между телами».

Короче говоря, мы понимаем, что единственным способом прийти к какому-либо решению о форме вселенной, а значит, и о проблеме относительности вращения, является астрономическая наблюдательная деятельность, в частности, измерение скоростей звезд в Млечном Пути и шаровых скоплениях.

Существует также третий тип Вселенной, гиперболическая Вселенная де Ситтера, которая также математически возможна. Во Вселенной де Ситтера, как и в квазииневклидовой, материя никогда не может создать пространство-время *в целом*, и в результате идея Маха должна быть отвергнута. Но и в этом случае де Ситтера к гиперболической вселенной приводит не философское неприятие вселенной, созданной материей, а восстановление абсолютного времени в цилиндрической вселенной, а также отсутствие инвариантности граничных условий, которые его беспокоят. Это отсутствие инвариантности ограничивает ковариантность законов природы и, следовательно, с чисто математической точки зрения противоречит общему принципу относительности. Де Ситтер критикует цилиндрическую вселенную следующими словами:

«Следует отметить, что эта относительность инерции реализуется только путем придания времени практически абсолютного характера. Верно, что фундаментальные уравнения теории, уравнения поля и уравнения движения ... остаются инвариантными для

всех преобразований. Но только для тех преобразований, для которых в бесконечности $t' = t$ может быть выполнено без изменения значений (IA)».^[154]

Эти дискуссии о форме Вселенной выявляют еще один важный аспект методологии науки. Мы можем заметить, что согласие, которое было практически единодушным в первой части теории, теперь уступает место разногласиям. Причина этого, конечно, очевидна. В первой части экспериментальные проверки были скоро готовы и позволили нам решить вопрос так или иначе. Но когда речь идет о форме Вселенной, проверки чрезвычайно затруднительны; они зависят от утомительных астрономических наблюдений, которые могут потребовать столетий для завершения. Следовательно, единственный способ продвижения вперед — исследовать все математические возможности в надежде, что так или иначе мы сможем прийти к *эксперименту crucis*. Де Ситтер делает акцент на математическом принципе относительности. Эйнштейн принимает позицию физика и предпочитает подчеркивать динамический аспект относительности. Вейль и Эддингтон более привержены чистой физике поля, следуя процедуре, введенной Максвеллом и Фарадеем.

Но во всех случаях движущей силой этих попыток было стремление математически скоординировать максимальное количество экспериментальных фактов самым простым способом. Эти факты были собраны из различных областей физической науки, и именно благодаря их широкому разнообразию полученные выводы являются убедительными. Кроме того, следует отметить, что факты, на которые ссылаются, являются результатами высокоточных экспериментов. Это снова важно, поскольку мы видели, что разница в одну или другую сторону в виде крошечной доли угла или длины может быть достаточной, чтобы опровергнуть всю теорию.

Подводя итог этим открытиям, мы видим, что материальная вселенная, предполагающая полную относительность всех движений по отношению к вселенским массам, представляется математически возможной. Если это решение является правильным, то краеугольный камень абсолютного пространства Ньютона окончательно разрушен. Если же, с другой стороны, цилиндрическая вселенная окажется несостоятельной, мы вряд ли сможем утверждать, что абсолютный фон движения был устранен. По крайней мере, в этой мере идеи Ньютона останутся в силе.

Короче говоря, мы видим, что проблема относительности вращения, взаимоотношений между материей и протяженностью, конечности Вселенной не может быть решена с помощью философии и *априорных* аргументов. Только математическая координация фактов, полученных в результате сверхточных экспериментов, может дать нам ответ. Как говорит Вейль:

«Историческое развитие проблемы пространства учит нас, как трудно нам, людям, погрязшим во внешней реальности, прийти к окончательному выводу. Длительный этап математического развития, великое расширение геометрии от Евклида до Римана, открытие физических фактов природы и лежащих в их основе законов со времен Галилея, а также непрерывные импульсы, придаваемые новыми эмпирическими данными, и, наконец, гениальность отдельных великих умов, таких как Ньютон, Гаусс, Риман, Эйнштейн, — все эти факторы были необходимы, чтобы освободить нас от внешних, случайных, несущественных характеристик, которые в противном случае удерживали бы нас в плену».

Безусловно, по мере накопления знаний и роста наших математических способностей мы можем быть вынуждены пересмотреть прежние выводы. Именно поэтому выводы Эйнштейна отличаются от выводов Ньютона, так же как выводы наших потомков могут отличаться от наших сегодняшних. Но главное, что нужно понять, это то, что эти изменения

в нашем философском мировоззрении вызваны ростом наших знаний как в математике, так и в физике; а этот рост требует веков: его невозможно достичь за одну ночь. Действительно, если бы Эйнштейн жил во времена Ньютона и игнорировал современные математические и физические открытия, он никогда не смог бы улучшить решение Ньютона. И наоборот, если бы Ньютон жил в наше время и был знаком с фактами, известными современной науке, вполне возможно, что он создал бы теорию относительности.

В нашем анализе методологии научных теорий мы попытались показать, что выводы великих ученых всегда основывались на экспериментах, а не на беспочвенных догадках. Но это не означает, что другие факторы не играли никакой роли. Например, мы упомянули, что правильный выбор фактов имел первостепенное значение. В то время как один выбор может не привести ни к чему интересному, другой может привести к великому открытию. Показательным примером этого является отношение Эйнштейна к хорошо известному тождеству двух масс.

Но и это еще не все. В математике, как и в архитектуре, некоторые координации являются красивыми, а другие — тяжеловесными или несимметричными. Поэтому, когда физические явления переводятся в математические формулы, теоретический физик всегда будет стремиться получить красивые уравнения, а не неуклюжие. Конечно, поскольку он должен ограничиваться рабским переводом физических результатов, его инициатива в этом отношении может быть чрезвычайно ограниченной. Тем не менее, в некоторых случаях возможно добавить в уравнения незаметный член, хотя этот член может и не требоваться экспериментом. Если этот дополнительный член делает уравнения более красивыми, то будет все основания для его сохранения. Именно такое стремление руководило Максвеллом при открытии уравнений электромагнетизма. Экспериментальные данные, известные в его время, не позволяли установить, был ли необходим определенный дополнительный член. Тем не менее, Максвелл ввел его, потому что он украсил его уравнения, и таким образом привел к предсказанию существования электромагнитных волн. Как мы знаем, последующие эксперименты оправдали глубокое видение Максвелла. То же самое и с теорией относительности. Одна из причин ее большой привлекательности для математиков — это чрезвычайная гармония, красота и простота, которые она позволяет нам придать многим уравнениям физики.

Однако, если оставить в стороне эти эстетические соображения, можно сказать, что методология, которая привела нас к теории относительности, является той же методологией, которая привела к всем великим научным открытиям. Это методология Галилея, Ньютона и Максвелла: сначала установить экспериментальные факты, затем, по мере необходимости, сформулировать предварительные гипотезы или каркасы с единственной целью — скоординировать эти факты в единое целое с максимальной простотой. Только когда теория накопит достаточное количество фактов, можно изучать ее философские последствия. Отсюда следует, что любая попытка изменить обычный порядок и поставить философию выше науки приведет к сдерживанию будущих открытий, подчиняя точность обработки данных неточным догадкам. История человеческой мысли полна отброшенных философских предрассудков, сметенных прогрессом науки. Каждое новое научное открытие раскрывает аспекты природы или даже разума, как в чистой математике, о которых мы раньше и не подозревали. Сегодня это касается как открытий теории относительности, так и квантовой гипотезы. Именно потому, что философия теории математической физики может быть достигнута только *апостериорно*, как венчающее достижение, философия, которая начинает вырисовываться из открытий Эйнштейна, все еще находится в зародышевом состоянии. Дело не в том, что не удалось найти научного

философа достаточного уровня, а в том, что многие научные аспекты этой темы все еще остаются под вопросом. Следующий отрывок из Эйнштейна объяснит, что мы имеем в виду:

«Из нынешнего состояния теории следует, что электромагнитное поле, в отличие от гравитационного поля, основано на совершенно новом формальном *мотиве*, как будто природа могла бы с таким же успехом наделить гравитационный эфир [метрическое поле [155](#)] полями совершенно другого типа, например полями скалярного потенциала вместо полей электромагнитного типа.

«Поскольку, согласно нашим современным представлениям, элементарные частицы материи по своей сути также являются ничем иным, как конденсациями электромагнитного поля, наше современное представление о Вселенной представляет две реальности, которые концептуально полностью отделены друг от друга, хотя и связаны причинно-следственно, а именно гравитационный эфир [метрическое поле] и электромагнитное поле, или, как их также можно назвать, пространство и материя.

»Конечно, было бы большим прорывом, если бы нам удалось понять гравитационное поле и электромагнитное поле вместе как единую конформацию. Тогда впервые эпоха теоретической физики, основанная Фарадеем и Максвеллом, достигла бы удовлетворительного завершения. Контраст между эфиром [метрическим полем] и материей исчез бы, и благодаря общей теории относительности вся физика стала бы полной системой мышления, подобной геометрии и теории гравитации».

Мы процитировали этот отрывок в полном объеме, потому что, как нам кажется, читая между строк, можно понять более глубокие философские проблемы, связанные с нашим знанием о природе, а значит, и с знанием в целом, которые до сих пор затуманивают значение теории относительности.

ГЛАВА XXXIX

КООРДИНАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОВ, ДОСТИГНУТАЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В предыдущей главе мы видели, что ньютоновская синтез успешно скоординировала земную механику с небесной механикой, или, иначе говоря, обычную механику с законами движения планет; а позже Максвелл объединил оптику и электричество. Теория относительности идет гораздо дальше и достигает синтеза практически всех различных областей физической науки, включая космологию и внутренние механизмы атомов. Так же как открытия Ньютона стали возможными благодаря введению инерциальной системы отсчета, привязанной к звездам, так и синтез Эйнштейна был естественным результатом принципа относительности галилеева движения и постулата об инвариантности скорости света *в вакууме* по отношению к любой галилеевой системе отсчета.

Можно напомнить, что физические факты, скоординированные Эйнштейном, изначально были исключительно электромагнитного характера. Во-первых, все отрицательные эксперименты были объяснены автоматически, но в этом, конечно, не было никакой заслуги, поскольку вся теория основана на принятии этих отрицательных результатов. Однако подобные аргументы больше не действуют, когда мы рассматриваем эксперимент Физо, поскольку между экспериментами Майкельсона и Физо нет никакой видимой связи. Следовательно, тот факт, что результат Физо является необходимым

следствием теории Эйнштейна, представляет собой первый весомый аргумент в пользу относительности. Можно также упомянуть, что теория требует численного результата, немного отличающегося от того, который предсказывали Френель и Лоренц, так что более точные наблюдения должны позволить экспериментаторам проверить правильность теории.

Возможно, самым ярким успехом специальной теории в электромагнетизме является то, что она позволяет нам предсказать, как будут изменяться электрические и магнитные поля при переходе от одной галилеевой системы отсчета к другой. Например, эксперимент доказывает, что электрон в состоянии покоя окружен электростатическим полем, тогда как тот же электрон в относительном движении, как известно, создает дополнительное магнитное поле, перпендикулярное электростатическому полю. До открытия преобразований Лоренца-Эйнштейна эти экспериментальные результаты были отмечены, но не было найдено никакого объяснения возникновению магнитного поля при движении. Соответственно, для определения его направления и интенсивности использовалась эмпирическая формула. Но как только были применены формулы преобразования, вся проблема была решена, было получено теоретическое объяснение этих загадочных фактов, и классические эмпирические формулы оказались лишь приблизительными. Тогда стало ясно, что электрические и магнитные поля больше не являются отдельными единицами, а лишь относительными аспектами одной и той же сущности — тензора электромагнитного поля.

Рассматривая теорию с чисто математической точки зрения, мы обнаружили, что в нашу координацию уравнений электродинамики была введена великолепная красота и симметрия; формулы, которые всегда казались несвязанными, теперь показали себя тесно связанными. Это было особенно очевидно в законах, выражающих сохранение электромагнитной энергии и импульса. С точки зрения теоретического исследователя, эти математические упрощения имеют большое значение, поскольку они раскрывают единство и гармонию в природе, которые, правильно или неправильно, заставляют нас верить, что мы находимся на правильном пути. Переходя к механике, мы обнаруживаем, что увеличение массы с относительной скоростью становится необходимым следствием теории; и таким образом эксперимент Бухерера объясняется с чрезвычайной простотой. По той же причине, распространяя эти открытия на астрономию атома, Зоммерфельд смог предсказать существование тонких спектральных лучей, которые впоследствии были наблюдаемы Пашеном. Еще одним требованием теории было отождествление массы с энергией; и эта непредвиденная взаимосвязь позволила ученым объяснить загадочные аномалии в атомных весах последовательных атомов. Из этого также следовало, что свет, будучи формой энергии, должен проявлять массу и, следовательно, импульс; так что предыдущие теоретические предположения Максвелла и Бартоли (позже подтвержденные экспериментально) также оказались в согласии с теорией относительности. Аналогичным образом, электромагнитная энергия электрона приводила бы к тому, что он обладал бы массой. Как и в случае с теоремами сохранения в электричестве, та же прекрасная симметрия была очевидна в механике. Специальная теория, как мы знаем, предполагает существование пространства-времени; и с пространством-временем вместо отдельного пространства и времени были наконец преодолены трудности, с которыми столкнулась классическая наука, пытаясь представить себе структуру пространства, способную объяснить различия в динамических проявлениях, сопровождающих галилеево и ускоренное движение. На этом заканчивается список наиболее важных фактов, согласованных специальной теорией.

Общая теория была предложена в связи с загадочным тождеством двух типов масс, инерционной и гравитационной, которое, по-видимому, было установлено в ходе самых точных экспериментов. Это отождествление двух типов масс потребовало отождествления инерционных и гравитационных сил и привело к постулату эквивалентности. Как непосредственное следствие этого появилась кривизна пространства-времени в гравитационном поле, и закон гравитации стал законом кривизны пространства-времени. Существовал ряд математически возможных законов кривизны пространства-времени, и Эйнштейн выбрал самый простой. Затем было обнаружено, что этот самый простой закон кривизны почти идентичен закону Ньютона. Он давал прецессионное опережение перигелия Меркурия, которое уже наблюдали астрономы, и требовал в дополнение три новых эффекта, все из которых были неизвестны науке. Это были двойное искривление луча света, проходящего вблизи Солнца, эффект сдвига Эйнштейна и неевклидовость пространственных измерений в гравитационном поле. Первые два эффекта с тех пор были подтверждены, в то время как расчеты доказывают, что последний эффект слишком незначителен, чтобы можно было надеяться на его обнаружение. Кроме того, согласно теории, сила гравитации никогда не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Телам или звездам с заданной плотностью присваивается определенное ограничение по размеру. Следовательно, для тела с заданной массой также предписывается верхний предел плотности.

Дальнейшие теоретические соображения касаются удивительной связи, которая, как показывается, существует между законами, ранее считавшимися совершенно отдельными, а именно законами сохранения и гравитации. Аналогичным образом, благодаря пространству-времени, действие, которое в классической науке, несмотря на его огромную физическую важность, выражалось столь искусственным математическим выражением, теперь теряет свою искусственность. Кроме того, теперь можно избежать неприятного телеологического аспекта принципа наименьшего действия.

С чисто теоретической точки зрения, теория, по-видимому, предполагает необходимое существование постоянных сущностей (материи), воздействующих друг на друга через пространство. Мы можем понять, как это происходит, следующим образом: предположим, что нам сказали, что мир представляет собой четырехмерное пространство-время и что все в нем состоит из пространственно-временных элементов структуры, называемых «*Gik*». Исходя из чисто математических рассуждений, мы должны были бы обнаружить, что с помощью «*Gik*» можно построить тензорные выражения, которые проявляют консервативные свойства (); следовательно, постоянные сущности были бы рационально возможны в пространственно-временном мире. Вне и вокруг этих постоянных сущностей предполагалась бы остаточная кривизна пространства-времени, так что можно было бы ожидать появления поля силы, либо притягивающего, либо отталкивающего; а закон распределения силы соответствовал бы приблизительно закону обратной квадратичной зависимости. Таким образом, материя и гравитация, хотя и не навязываемые *априори*, все же представлялись бы вероятными следствиями теории пространства-времени. [\[156\]](#) Ничего подобного не встречалось в классической науке.

Наконец, перейдем к космологическим соображениям. Общая теория оставляет нам свободу выбора между бесконечной вселенной пространства-времени, в которой звездная материя была бы сконцентрирована в ядре, или между двумя основными типами конечной вселенной: вселенной де Ситтера и вселенной Эйнштейна. Стабильность распределения звезд указывает на цилиндрическую вселенную Эйнштейна. Если принять эту модель, то относительность вращения и полная относительность массы, обусловленная

взаимодействиями между телами, идея, столь дорогая Маху, наконец-то может быть оправдана. Из всех этих различных соображений мы можем понять, насколько обширна природа синтеза, осуществленного Эйнштейном, и насколько разнообразны явления, которые он координирует.

Если бы любой из упомянутых экспериментов и прогнозов дал результаты, даже незначительно отличающиеся от ожиданий теории, то, по всей вероятности, пришлось бы отказаться от теории относительности.^[157] Мы видим, что теория чрезвычайно хрупка и может быть опровергнута в любой момент, но именно это и говорит в ее пользу. В общем плане можно сказать, что хрупкость теории является мерой ее согласованности. Ведь когерентная теория, объединяющая в одной доктрине большое количество фактов и прогнозов, неизбежно рушится из-за самой своей когерентности, когда какой-либо из ее прогнозов опровергается экспериментом. Теория, полная гипотез *ad hoc*, никогда не бывает хрупкой; когда эксперимент не подтверждает теорию, все, что нам нужно сделать, это изменить гипотезы *ad hoc* или ввести новые. Но теория такого рода не соответствует основным требованиям научной теории, поскольку на ее предсказания нельзя полагаться. Большое достоинство теории относительности заключается именно в ее свободе от гипотез *ad hoc*; отсюда проистекают как ее хрупкость, так и ее ценность.^[158]

Тем не менее, хотя теория Эйнштейна удалось скоординировать практически все наши физические знания, все еще остается несколько загадочных аспектов науки, которые не были объяснены. Понимание электрона (а значит, и материи) и природы давления Пуанкаре, которое предотвращает его взрыв под действием взаимных отталкивающих сил его различных частей, остается загадкой. Кажется невозможным построить электрон только на основе величин электромагнитного поля; как будто электрон должен содержать что-то еще, помимо электромагнитных сил. Другими словами, то, что известно как физика поля (которую мы обязаны Максвеллу и Фарадею), оказывается неспособным объяснить существование электронов и материи. Все, что можно сказать, это то, что теория относительности, по-видимому, предполагает, что сила сцепления, которая удерживает электрон (давление Пуанкаре), имеет гравитационную природу и связана с кривизной Вселенной. С другой стороны, существование электричества в двух разных аспектах, положительном и отрицательном, еще предстоит объяснить. Как отмечает Вейль, это можно объяснить выбором иррационального выражения для действия; это также может быть связано с ходом времени от прошлого к будущему. Но, прежде всего, явления квантов, атомарность материи, энергии и действия по-прежнему представляют собой нерешенные задачи для математиков.

Мы уже упоминали в других местах о природе исследований Планка и видели, что они привели к открытию универсальной константы h , представляющей атом действия. Другими словами, в природе, по-видимому, существует определенный атом действия, называемый квантом действия, так же как, по-видимому, существуют два определенных атома электричества, а именно положительный атом, или ядро атома водорода, и отрицательный атом, называемый *электроном*. Именно потому, что этот атом действия, по-видимому, имеет такое фундаментальное значение, мы должны стремиться обнаружить его присутствие в нашей пространственно-временной модели Вселенной. Однако ни малейшего намека на него обнаружить не удается.

Это не означает, что невозможно найти единицу действия. Действительно, действие, связанное с совокупностью конечной вселенной, можно было бы принять за единицу. Но эта единица действия была бы огромной, слишком большой, чтобы ее можно было

отождествить с единицей Планка, и кажется невозможным обнаружить единицу действия таких бесконечно малых размеров, как квант действия Планка. Также маловероятно, что такой бесконечно малый атом действия когда-либо будет обнаружен в нашей модели пространства-времени, будь то модель Эйнштейна или Вейля. Поскольку пространство-время с самого начала предполагается как непрерывное многообразие, единственные фиксированные величины, относящиеся к объемам в пространстве-времени и способные представлять действие, всегда будут иметь космические пропорции, охватывая всю протяженность конечной вселенной. Чтобы получить разрывы или атомы бесконечно малых размеров, необходимо предположить, что эта разрывность присуща структуре пространства-времени; и это привело бы нас к гранулярной концепции пространства-времени, противоположной нашей нынешней концепции непрерывности. Мы должны были бы предположить, что кажущаяся непрерывность фундаментального многообразия была обусловлена нашим макроскопическим изучением его; точно так же, как кусок полированного мрамора может казаться непрерывным, когда мы проводим пальцами по его поверхности, в то время как его прерывистая природа была бы обнаружена, если бы мы изучали его с помощью мощного микроскопа. Такая точка зрения подразумевала бы, что секрет квантов действия Планка был бы раскрыт только в том случае, если бы мы изучали пространство-время в микроскопическом масштабе. Тогда все наше понимание природы изменилось бы, поскольку эта атомарность действия могла бы повлечь за собой атомарность пространства и времени, доказывая, что пространство и время, как их обычно понимают, были лишь приблизительными понятиями.

Кроме того, следует упомянуть, что, следуя другой линии мысли, де Бройль и Шредингер сумели пролить новый свет на значение квантовых явлений. Приняв волновую теорию материи, Шредингер доказал, что существование энергетических уровней внутри атома (как постулировал Бор) может быть математически выведено из решений определенных волновых уравнений. Таким образом, наше понимание материи приобретает самый революционный характер. В свете новых исследований механика атома будет стоять на совершенно иной основе, чем классическая или даже релятивистская наука. Так же как классическая механика представляется первым приближением, справедливым для низких скоростей, но не работающим для высоких скоростей, в случае которых ее место должна занять более обширная релятивистская механика, так и теперь релятивистская механика перестает быть применимой, когда речь идет о крошечных областях атомных размеров. Здесь более всеобъемлющая волновая механика Шредингера будет соответствовать реальности. Таким образом, мы видим, что эти последовательные научные конструкции представляют собой все более и более точные приближения, каждая из которых дегенерирует в свою предшественницу, когда игнорируются определенные уточнения.

Можно также сказать, что перемены, через которые сейчас проходит материя, имеют поразительное сходство с теми, через которые прошло наше понимание оптики в XIX веке. Здесь, также при рассмотрении крошечных областей, размеры которых сопоставимы с длиной волны, возникли явления дифракции, которые старая геометрическая оптика не могла объяснить. Ее место заняла волновая оптика. Но нельзя не подчеркнуть, что эта новая волновая механика Шредингера, которая, по-видимому, набирает обороты, ни в коем смысле не ставит под угрозу главное достижение теории относительности, а именно открытие пространства-времени. Пространство-время включено в новую механику наряду с другими результатами Эйнштейна. В нынешнем состоянии этих высокоабстрактных исследований доступно не так много достоверной информации, и было бы пустой тратой времени гадать, что приготовит нам будущее.

ГЛАВА XL

ОБЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теория относительности, как мы видели, является частью математической физики, и ее единственной целью было скоординировать как можно большее количество природных явлений и экспериментальных результатов как можно более простым и прямым образом. Как и все другие великие достижения теоретической физики, она строго придерживается научных методов. Но теперь, когда математико-физическая координация завершена, становится допустимым исследовать изменения, которые теория может потребовать в нашем философском понимании природы.

Наиболее интересным аспектом всей теории для философов, по-видимому, является открытие пространства-времени с парадоксами ощущений, к которым оно приводит. Таким образом, продолжительность нашей жизни, расстояние, которое мы преодолеваем, не имеют абсолютного значения. Двое близнецов могут прожить по семьдесят лет по своим собственным оценкам, но если они встретятся снова перед смертью, один из них может оказаться моложе другого. Двое мужчин, выйдя из одной точки и путешествуя в одном направлении, могут преодолеть то, что они измеряют как одинаковое расстояние, но, остановившись, обнаружить, что они находятся на расстоянии многих миль друг от друга. Дело в том, что расстояние и продолжительность не являются абсолютными; они лишь выражают отношение между чем-то абсолютным и пространственно-временной системой координат или движением наблюдателя. Нет больше причин удивляться упомянутым нами любопытным результатам, чем относительному характеру длины тени, отбрасываемой шестом, или угла зрения, под которым мы видим шест.

Как непосредственное следствие этой относительности расстояния и продолжительности, мы должны принять относительность одновременности. Классическая наука признавала, что понятие одной и той же точки пространства, рассматриваемой в разное время, не может иметь абсолютного значения; поскольку точки пространства могут быть определены только по отношению к системе отсчета, два события, происходящих последовательно в одной и той же точке нашей системы, очевидно, будут происходить в двух разных точках какой-либо другой системы, движущейся по отношению к первой. С другой стороны, классическая наука отказывалась распространять подобные релятивистские соображения на понятие одного и того же момента времени в двух разных точках. Предполагалось, что смена системы отсчета не может повлиять на скорость течения времени, которая остается абсолютной и одинаковой для всех наблюдателей. Именно эта вера в абсолютную природу одновременности была разрушена открытиями Эйнштейна. Отныне абсолютному одинаковости времени в разных местах нельзя придавать большее значение, чем абсолютному одинаковости местоположения в разное время.

Мы можем вспомнить, что все эти так называемые парадоксы относительности ни в коем случае не являются антиномиями разума или логики, которые теория не смогла бы выдержать. Это всего лишь парадоксы ощущений, которые возникают, когда по силе привычки мы продолжаем преследовать классические концепции абсолютной продолжительности и расстояния и ошибочно приписывать им некую *априорную* неизбежную логическую необходимость.

Если учесть, что практически нет ни одной области нашего понимания физической вселенной, на которую теория относительности не пролила бы новый свет, то можно понять, что полное значение ее открытий еще далеко не установлено. Тем не менее, в отношении понятий пространства и времени собрано достаточно положительной информации, чтобы сделать некоторые философские выводы вполне обоснованными. Теория окончательно доказала, что к реальному пространству и реальному времени можно приблизиться только эмпирическими методами, и в частности, с помощью сверхточных экспериментов.

При обсуждении пространства мы упомянули, что философия Канта о *приоритетной* природе трехмерного евклидова пространства как формы чистой чувствительности была опровергнута много лет назад математиками, начиная с Гаусса. Для ученых этот вопрос был окончательно решен. Теория относительности лишь подтверждает эти взгляды, обосновывая их не только с физической, но и с математической точки зрения. Отныне четырехмерное пространство-время, которое, хотя и является плоским, но неевклидовым (в расширенном смысле) из-за отрицательной размерности времени, составляет фундаментальный континуум вселенной. Если бы не была общей теории, можно было бы утверждать, что пространство-время не имеет глубокого значения и сводится к простому удобному способу математического представления, подобно графику стрелки барометра. Хотя мы можем утверждать (даже ограничиваясь специальной теорией), что это мнение было бы несостоятельным, использование Эйнштейном пространства-времени в общей теории полностью исключает такую точку зрения. С пространством-временем мы имеем дело с новым континуумом, который имеет точно такую же степень реальности, какая ранее приписывалась трехмерному пространству.

Теперь мы видели, что с отказом от *априорной* кантовской позиции математики задолго до появления теории Эйнштейна вернулись к эмпирической философии пространства как результату простейшей координации наших сенсорных впечатлений. В частности, предполагалось, что кажущаяся неизбежность евклидова пространства является результатом координации сенсорного опыта, будь то индивидуального или видового. Другими словами, именно поведение материальных тел и лучей света считалось основным источником нашего естественного убеждения в евклидовости пространства. Но здесь можно выдвинуть возражение, поскольку вполне справедливо утверждать, что, согласно Эйнштейну, поведение материальных тел и лучей света таково, что дает пространство-время, а не раздельное пространство и время. Как же тогда объяснить, почему пространство-время не утвердилось еще много веков назад и почему пришлось ждать появления Минковского и Эйнштейна?

Причина, конечно, очевидна. Теоретически, между пространством-временем и отдельным пространством и временем существует большая разница в структуре, и эта разница, как мы знаем, возникает из-за конечной инвариантной скорости в пространстве-времени в отличие от ее бесконечной величины в отдельном пространстве и времени. Чем выше относительные скорости тел и, в частности, чем ближе они приближаются к критической скорости света, тем более заметными становятся физические различия между этими двумя мирами. А поскольку скорости тел, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, чрезвычайно малы по сравнению со скоростью света, наше грубое восприятие не позволяет нам обнаружить мельчайшие различия, которые теоретически присутствуют. Поэтому, по сути, мир обычного опыта является миром отдельного пространства и времени, а не пространства-времени. Точно так же простое наблюдение за ландшафтом не способно раскрыть шарообразность Земли. Итак, мы понимаем, почему

открытие пространства-времени пришлось ждать до проведения сверхточных физических экспериментов. Конечно, мы можем представить себе существ, чьи чувства настолько развиты, что они способны обнаруживать мельчайшие различия, которые ускользают от нас. Если бы такие существа существовали, то есть все основания полагать, что их чувствительность воспринимала бы пространство-время как нечто само собой разумеющееся, так же как наша воспринимает трехмерное евклидово пространство и время. По словам Эддингтона: «Это просто случайность, что мы не обладаем парой глаз, способных к быстрому относительному движению, что позволило нашему мозгу не развивать способность визуализировать этот четырехмерный мир так же непосредственно, как мы визуализируем его трехмерную часть». Будучи так плохо оснащенными сенсорными органами, неспособными различать мельчайшие расхождения, возникающие, когда S очень велико, хотя и конечно, а C бесконечно, мы попали в колею и с незапамятных времен верили в мир, состоящий из отдельных пространства и времени. Нет причин удивляться парадоксам ощущений, которые мы испытываем, когда нам рассказывают о странных открытиях, которые последовали бы, если бы относительные скорости стали очень большими или наши чувства стали более острыми. Точно так же, совершенно независимо от открытий теории относительности, если бы наши глаза внезапно обрели микроскопическое зрение, наш привычный мир стал бы настолько ужасающим, что его было бы невозможно описать.

Существенной характеристикой пространства-времени является то, что оно не демонстрирует абсолютного разделения между пространством и временем, которое было бы одинаковым для всех наблюдателей, независимо от их движения. Каждый наблюдатель будет разделять его по-своему, так что совокупность пространства в один момент времени для одного наблюдателя станет последовательным распределением точек по всему пространству в последовательности моментов времени для другого. Конечно, пока мы рассматриваем только наши непосредственные восприятия, мы всегда будем разделять пространство-время на отдельное пространство и время; и этот факт был истолкован некоторыми как означающий, что объединение пространства и времени явно искусственно, поскольку его можно так легко разделить на пространство и время. Разумеется, этот аргумент несостоятелен. Ведь пространство и время, которые мы получаем в результате разделения пространственно-временного континуума, соответствуют частному взгляду на мир, а частные взгляды, рассматриваемые в изоляции, никогда не дают нам объективного мира. Только определенная конструкция или синтез частных взглядов может считаться представителем объективной реальности. Возвращаясь к примеру из классической науки, не форма камня, видимая отсюда или оттуда, дает нам знание о форме камня, а исключительно синтез видимостей камня, видимых отсюда, оттуда и откуда угодно. В теории относительности мы также должны учитывать восприятие наблюдателей, движущихся с различными относительными движениями. Тогда выясняется, что объективная форма, размер и продолжительность больше не могут быть построены путем синтеза частных взглядов, в отличие от того, что ошибочно предполагала классическая наука. По этой причине расстояние и временное разделение, или, что то же самое, пространство и время, хотя и остаются реальными с точки зрения частного взгляда, больше не могут считаться основой общего объективного мира. С объективной точки зрения такие понятия являются неоднозначными, и мы должны заменить их пространственно-временным миром и пространственно-временными конфигурациями. Короче говоря, необходимо понимать, что пространство-время — это совершенно новое понятие, новое как в науке, так и в философии, и его не следует путать с просто искусственным представлением направлений времени и пространства на графиках, как это часто делала классическая наука.

Возможно, будут полезны дополнительные иллюстрации пространства-времени. Так, если мы рассмотрим трехмерное пространство, занимаемое атмосферой, и обратим внимание на изменения температуры, происходящие от места к месту, мы вправе говорить о четырехмерном континууме пространство-температура. Но очевидно, что мы можем разделить эти две сущности и изучать их по отдельности, получая тем самым два отдельных континуума: пространственный и температурный. В классической науке с пространством и временем было примерно то же самое. Мы могли рассматривать их совместно как составляющие четырехмерное континуум событий, но затем, в силу абсолютной природы времени и расстояния, мы могли разделить их. Когда это было сделано, как трехмерное пространство, так и одномерное время были разделены на отдельные самоподдерживающиеся континуумы.

В пространстве-времени относительности такое разделение невозможно. Мы не можем убрать временное измерение, поскольку оно больше не является уникальным. Если мы отменим его для какого-то определенного наблюдателя, оставив ему мгновенное пространство, то мы искажим мгновенное пространство, не отменив время, по оценке другого наблюдателя, находящегося в относительном движении. Таким образом, мы видим, что в то время как в классической науке присоединение времени к пространству было искусственным, поскольку время и пространство всегда можно было разделить, как масло и уксус, в теории относительности это уже не так. Пространство и время теперь смешаны и, можно сказать, составляют одно целое. Очень грубо говоря, можно сказать, что пространство-время больше похоже на опал, излучающий различные цвета в разных направлениях. Так же как в случае с пространством-временем было невозможно уничтожить время или пространство для всех наблюдателей, так и в случае с опалом было бы невозможно отменить все точки, отражающие зеленый свет и только зеленый свет, поскольку, если бы мы следовали этому курсу с точки зрения одного наблюдателя, мы не достигли бы нашей цели с точки зрения другого.

Рассмотрим теперь характеристики метрических континуумов. С математической точки зрения, метрический континуум — это такой континуум, с которым можно связать геометрию, и, следовательно, получить инвариантное выражение для расстояния, разделяющего две точки континуума, причем значение этого выражения будет одинаковым для всех наблюдателей. В случае пространства-времени это означало бы, что расстояние между любыми двумя точечными событиями должно иметь одинаковое пространственно-временное разделение для всех наблюдателей, независимо от их движения. Однако в пространстве и времени классической науки такое инвариантное пространственное и временное расстояние было невозможно. Простой пример может прояснить этот момент. Предположим, что в классической науке мы стоим на железнодорожной насыпи и наблюдаем за двумя мгновенными событиями — скажем, двумя вспышками света, испускаемыми двумя пространственно разнесенными сигналами на линии. Принимая во внимание скорость, с которой световые сигналы продвигались к нам, и измеряя наше расстояние от соответствующих сигналов, мы могли бы определить пространственное расстояние между двумя сигналами и соответствующие моменты времени, в которые произошли вспышки. Таким образом, мы должны получить временное и пространственное разделение двух событий по отношению к насыпи. Но предположим теперь, что мы наблюдали те же два события из поезда, движущегося с постоянной скоростью по рельсам. В классической науке время является абсолютным, поэтому временное разделение между двумя событиями, конечно, не изменится. Однако пространственное разделение по отношению к поезду, как правило, будет другим. Мы можем понять это, предположив, что поезд прошел мимо двух последовательных сигналов, когда были выпущены их соответствующие вспышки; в этом случае, *относительно поезда*, два события произошли

бы в одной и той же точке поезда, и поэтому их пространственное разделение было бы равно нулю. Таким образом, мы видим, что временное разделение было бы одинаковым в обоих случаях, тогда как пространственное разделение изменилось бы. В результате пространственное и временное разделение не могли бы оставаться неизменными. Чтобы расстояние между двумя точечными событиями проявилось как неизменное, мы можем предположить, что временное расстояние также должно варьироваться таким образом, чтобы компенсировать изменение пространственного расстояния. Абсолютность времени в классической науке делала это невозможным, и именно это имеется в виду, когда говорится, что пространство и время не были объединены в одно непрерывное целое в каком-либо глубоком смысле.

Теперь Эйнштейн говорит нам, что если бы мы проводили наши измерения с чрезвычайной точностью, используя наши обычные хронометры и жесткие стержни, мы бы обнаружили, что временное расстояние между двумя событиями слегка изменилось; и что в результате это небольшое изменение компенсировало бы соответствующее изменение пространственного расстояния, оставляя пространственно-временное расстояние неизменным.

Назовем x, t, x' и t' пространственными и временными интервалами, измеренными

$$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2.$$

соответственно с набережной и с поезда, мы бы обнаружили, что

Здесь, таким образом, было выражение пространственно-временного расстояния между двумя событиями, или, вернее, его квадрата. Именно тот факт, что наши измерения подтвердили бы неизменность этого расстояния, позволяет нам рассматривать пространство и время как слитые воедино. Нельзя не подчеркнуть, что наши часы и стержни были бы обычными часами и стержнями классической науки. Они не были бы настроены таким образом, чтобы вынуждать релятивистские результаты, как часто ошибочно предполагается; ведь в таком случае теория была бы искусственной и бесполезной. Таким образом, все, что предполагает теория, это то, что наши обычные стержни и часы ведут себя не совсем так, как мы привыкли считать. [\[159\]](#)

Таким образом, мы видим, что сопоставление пространства и времени в классической науке было столь же искусственным, как и сопоставление пространства и температуры. Короче говоря, реальность пространства-времени возникает из открытия Минковского, что можно определить инвариантное расстояние между двумя точками в пространстве-времени, которое будет одинаковым для всех наблюдателей, и что невозможно определить такое инвариантное расстояние только в пространстве или только во времени, что показывает, что пространство и время сами по себе являются призраками. Эти два последних понятия отныне должны рассматриваться совместно, а не как отдельные сущности.

Теперь очевидно, что если модель пространства-времени должна избавить нас от конфликта с некоторыми фундаментальными фактами сознания, то необходимо, чтобы какое-то математическое различие отличало направления времени от направлений пространства. Однако нам не нужно ожидать каких-либо трудностей со стороны модели пространства-времени в этом отношении, поскольку мы знаем, что из-за неоднородности, существующей между направлениями времени и направлениями пространства, пространство-время является анизотропным. Учитывая эту особенность, мы видим, что

пространство-время вокруг любой точки-события можно разделить на пучок направлений времени и пучки направлений пространства; однако они никогда не могут пересекаться с пучком времени. Затем из этого пучка возможных направлений времени каждый наблюдатель выберет ту конкретную линию, которая составляет его мировую линию через пространство-время. Что касается течения психологического времени, или продолжительности между двумя психологическими событиями, измеренной часами, находящимися рядом с нами, то она будет определяться пространственно-временной длиной нашей мировой линии, ограниченной этими двумя событиями. Таким образом, две мировые линии одинаковой длины всегда будут соответствовать одинаковой продолжительности времени, прожитого наблюдателями, которые следуют этим мировым линиям. Например, из двух идентичных атомов натрия, один из которых находится близко к Солнцу, а другой — далеко от него, атом, находящийся близко к Солнцу, будет отсчитывать время медленнее; но у обоих атомов отрезки мировых линий, ограниченные последовательными колебаниями, будут одинаковы по длине. Существование эффекта сдвига Эйнштейна подтвердило этот факт, и это равносильно утверждению, что атомы ведут себя как идеальные часы.

Что касается трех пространственных направлений наблюдателя, то они будут перпендикулярны его мировой линии или направлению времени. Если его направление времени искривлено из-за его ускорения или из-за внутренней кривизны пространства-времени, обусловленной материей, то направления пространства и времени будут правильно определены как перпендикулярные друг другу только в непосредственной близости от наблюдателя. В других местах определение ортогональности или перпендикулярности будет невозможно; в результате сами понятия времени и пространства становятся размытыми в общей теории, и мы должны довольствоваться системами координат, которые не являются измерениями ни в пространстве, ни во времени. Мы не можем останавливаться на этом типе трудностей, поскольку они требуют слишком технических объяснений; достаточно сказать, что именно эта сложность приводит к тому, что все проблемы, связанные с вращающимися дисками и гравитационными полями, страдают от определенной степени неясности, когда мы пытаемся интерпретировать их с точки зрения пространства и времени. Можно также добавить, что когда движутся большие массы, понятие одновременности во всем пространстве даже для данного наблюдателя теряет всякое точное значение.

Большая разница между нашими нынешними взглядами и взглядами классической науки заключается в том, что в то время как в классической науке наши линии исчисления времени и пространства были уникальными, теперь они предлагают неопределенное количество возможных альтернатив из-за множественности направлений времени и пространства, присутствующих в пространстве-времени. Это как если бы поток времени больше не представлялся единственным потоком, а представлялся рядом ветвей, расходящихся из каждой точки в разных направлениях. Несмотря на эту неоднозначность возможных направлений пространства и времени, мы видели, что каждому наблюдателю будет соответствовать определенное пространственное и временное разделение, так что вся неоднозначность исчезает [\[160\]](#), как только мы определили наблюдателя.

Странные результаты и концепции, которые раскрыла теория относительности, были использованы рядом авторов для обоснования ультраидеалистической философии природы. Эти люди пришли к выводу, что реальная объективная вселенная, о которой ученые не уставали говорить, была разрушена, и что реалистическая наука наконец сдалась идеалистической школе философии. Такое мнение является результатом путаницы между точкой зрения науки и точкой зрения метафизического реалиста.

Подавляющее большинство современных ученых являются агностиками в том смысле, что они отвергают утверждение метафизического реалиста, который предполагает, что он обнаружил субстанцию и истинное бытие во внешнем мире. Они будут утверждать, что субстанция и вещь сама по себе непознаваемы, или, по крайней мере, что они ускользают от рационального исследования, и что объективный мир науки — не что иное, как ментальная конструкция, воображенная с целью координации наших сенсорных впечатлений. Но, признав этот момент, они признают, что эта ментально сконструированная объективная вселенная должна во всех отношениях рассматриваться как реальность, предшествующая наблюдателю, который открывает ее по частям. Это последнее мнение не является результатом какой-то философской системы. Оно навязывается ученым как неизбежный вывод; ведь если бы оказалось невозможным представить себе общую объективную вселенную, одинаковую для всех людей, наука никогда бы не существовала, поскольку она свелась бы к индивидуальным точкам зрения, которые никогда не могли бы быть скоординированы. Другими словами, знанию не хватало бы общности, а без общности не могло бы быть такой вещи, как наука.

Если бы, например, теория относительности не предоставила нам общего объективного мира, она никогда не смогла бы продвинуться далеко. Все, что мы можем правильно утверждать, это то, что объективный мир абсолютной продолжительности и расстояния исчез, что пространство и время как фундаментальные составляющие объективного мира превратились в простые тени. Другими словами, так называемые первичные качества формы, размера, продолжительности и массы, которые раньше считались абсолютными, теперь должны рассматриваться как относительные, не имеющие определенного значения до тех пор, пока не будет указан наблюдатель. Но за этой работой разрушения последовала работа восстановления, в результате которой новый объективный мир, мир пространства-времени с его неизменными интервалами, занял место отвергнутого мира отдельного пространства и времени.

Идеалистические метафизики имеют привычку быстро проходить мимо пространства-времени, как будто оно не имеет особого значения. Таким образом, они упускают из виду всю значимость теории Эйнштейна. Как говорит сам Эйнштейн: «Без пространства-времени общая теория относительности, возможно, не продвинулась бы дальше своих первых шагов». Даже если бы мы ограничили наши исследования голыми фактами теории, не изучая ее более глубоко, идеалистическая интерпретация вызвала бы серьезные возражения.

Рассмотрим, например, явление гравитации. Очевидно, что невозможно утверждать, что видимое искривление луча звездного света, проходящего вблизи Солнца, полностью обусловлено индивидуальными особенностями наблюдателя; ведь мы знаем, что если бы Солнце внезапно исчезло во время затмения, луч звездного света автоматически перестал бы искривляться, несмотря на то, что чисто субъективные особенности пространства и времени астронома, смотрящего в телескоп, не изменились бы. Опять же, в специальной теории вычисления пространства и времени различаются от одного наблюдателя к другому только в том случае, если между наблюдателями существует относительное движение. Нормы Петра не отличаются от норм Павла не потому, что Петр — это Петр, а Павел — это Павел, а только потому, что Петр и Павел находятся в относительном движении. Если бы их относительное движение прекратилось, их нормы перестали бы различаться.

Но это еще не все. Согласно идеалистическим взглядам, нормы различных наблюдателей настолько скорректированы благодаря какой-то чудесной заранее установленной

гармонии, что скорость света кажется одинаковой для всех. На самом деле это утверждение неверно, поскольку скорость света неизменна только для галилеевых наблюдателей; она изменяется от места к месту, если рассматривать ускоренных наблюдателей, а также изменяется вблизи материи. Опять же, если мы вернемся к эксперименту Майкельсона, то увидим, что его основная особенность заключается в том, что он продемонстрировал: независимо от скорости сферы в целом, лучи света, которые покидают центр в один и тот же момент времени, все возвращаются в центр в один и тот же момент, после того как отражаются от внутренней поверхности сферы. В этом эксперименте мы имеем дело со *совпадением*, с волнами света, которые проходят через одну и ту же точку в одно и то же время. Удлинение пространства и времени, вызванное индивидуальными особенностями наблюдателя, никогда не могло бы создать или нарушить такое совпадение. Они могут привести к тому, что продолжительность или расстояние будут казаться длиннее или короче, но они никогда не могут привести к тому, что два луча света пересекутся на поверхности какого-либо объекта, если они не пересекаются там по мнению всех других наблюдателей. Таким образом, пересечение или совпадение является абсолютным по той простой причине, что никакое увеличение никогда не приведет к тому, что одна точка будет казаться двумя отдельными точками. Точка не имеет размеров, которые можно разделить с помощью увеличения. Отсюда следует, что в эксперименте, подобном эксперименту Майкельсона, невозможно объяснить наблюдаемое совпадение особенностями наблюдателя; очевидно, что в природе существует нечто таинственное, которое необходимо рассматривать как существующее независимо от наблюдателя и находящееся в объективном мире науки. Это нечто, как оказалось, представлено пересечениями мировых линий в абсолютном пространстве-времени, *т. е.* в объективном мире науки.

На самом деле, в общей теории понятия пространства и времени становятся совершенно неопределенными, и только в самых простых типах задач возможно рассуждать в терминах пространства и времени. Как указывает Бертран Рассел, идеалистическая интерпретация, по-видимому, возникла из-за постоянной ссылки на «наблюдателя» в теории Эйнштейна. Однако следует понимать, что «наблюдатель» — это очень расплывчатый термин. Фотоаппарат и часы или любое другое механическое регистрирующее устройство были бы столь же подходящими для целей наблюдения, как и живой человек. Короче говоря, главная слабость сторонников идеалистической интерпретации, по-видимому, заключается в их желании во что бы то ни стало придерживаться пространства и времени. Они не понимают, что объективный мир относительности не может быть построен из пространства и времени таким же простым образом, как в классической науке. Подводя итог, можно сказать, что независимо от того, считается ли пространство-время метафизической реальностью или рассматривается как ментальная конструкция, созданная для координации нашего сенсорного опыта, в любом случае оно играет роль объективной реальности (в научном смысле). Поэтому мы должны представлять его, как сущность, предшествующую наблюдателю, который исследует его и локализует события в его субстанции.

Часто высказывается критика, что в модели пространства-времени Эйнштейна нет ничего, что позволяло бы нам объяснить самую фундаментальную особенность сознания — наше осознание течения времени. Трудно понять, почему такая критика должна быть направлена с большей оправданностью против пространства-времени, чем против классической теории. Тот факт, что в классической науке пространство и время были разделены, не позволял нам объяснить феномен течения времени лучше, чем теория пространства-времени. Утверждение Ньютона о том, что время течет, ничего не говорит нам о причине этого течения. Следовательно, мы должны прийти к выводу, что какие бы достоинства ни были в возражениях критиков, они с равной силой применимы к классической науке. Но когда мы анализируем причину этих возражений, мы обнаруживаем,

что критик исходит из предположения, что течение времени должно быть представлено как предсуществующее в объективной вселенной, и тем самым отрицает его чисто субъективную природу. Спекуляции такого рода никогда не приведут нас далеко в нынешнем состоянии наших знаний; но, если понадобится, ничто не мешает нам предположить, что пространство-время обладает динамическими свойствами, которые подталкивают естественные процессы от прошлого к будущему вдоль пучка временных направлений. Однако те, кто высказывает подобные взгляды, не достигли тем самым большого успеха; они просто убрали тайну течения времени из человеческого сознания и поместили ее в другое место в объективной вселенной. Кажется более безопасным признать, что наше осознание хода времени, по всей вероятности, носит субъективный характер и связано с нашим сознанием того, что мы живы. В этом случае мы должны предположить, что именно наше сознание поднимается по мировой линии, обнаруживая по мере своего движения события, расположенные в конусе его абсолютного прошлого. Эта точка зрения всегда отстаивалась наиболее авторитетными специалистами, в частности Минковским, Эйнштейном, Вейлем и Эддингтоном. Как говорит Вейль:

«Какой бы глубокой ни была пропасть, разделяющая интуитивную природу пространства и времени в нашем опыте, ничто из этой качественной разницы не входит в объективный мир, который физика стремится выделить из непосредственного опыта. Это четырехмерное континуум, которое не является ни «временем», ни «пространством». Только сознание, проходящее в одной части этого мира, воспринимает отдельный фрагмент, который встречается ему и проходит позади него, как *историю*, то есть как процесс, который движется вперед во времени и происходит в пространстве... Примечательно, что трехмерная геометрия статического мира, которая была введена в полную аксиоматическую систему Евклидом, имеет такой прозрачный характер, в то время как мы смогли овладеть четырехмерной геометрией только после длительной борьбы и с помощью обширного набора физических явлений и эмпирических данных. Только теперь теория относительности позволила нашему знанию о физической природе полностью понять факт движения, изменения в мире».

Как видно из приведенной выше цитаты, наше осознание хода времени объясняется прохождением нашего сознания через пространственно-временное континуум. Согласно взглядам Минковского, материальное тело тогда представляется мировой линией, или непрерывной цепочкой событий, вся длина которой подвергается изменению структуры, которое мы интерпретируем как означающее присутствие материи. Пока мы рассуждаем в терминах пространства-времени, это все, что мы можем сказать. Но когда в нашем привычном восприятии вещей мы, как чувствующие наблюдатели, разделяем мир на соответствующее пространство и время, то, что мы воспринимаем как мировую линию, — это ее мгновенное пересечение с нашим конусом пассивного прошлого. Если наша мировая линия и мировая линия наблюдаемого тела параллельны, то тело будет считаться находящимся в покое. Но если две мировые линии не параллельны, то при интерпретации вещей с точки зрения пространства и времени тело будет считаться находящимся в относительном движении.

Мы можем проиллюстрировать эти же взгляды, рассмотрев следующий пример: для удобства предположим, что пространство-время сведено к трем измерениям: двум пространственным и одному временному.

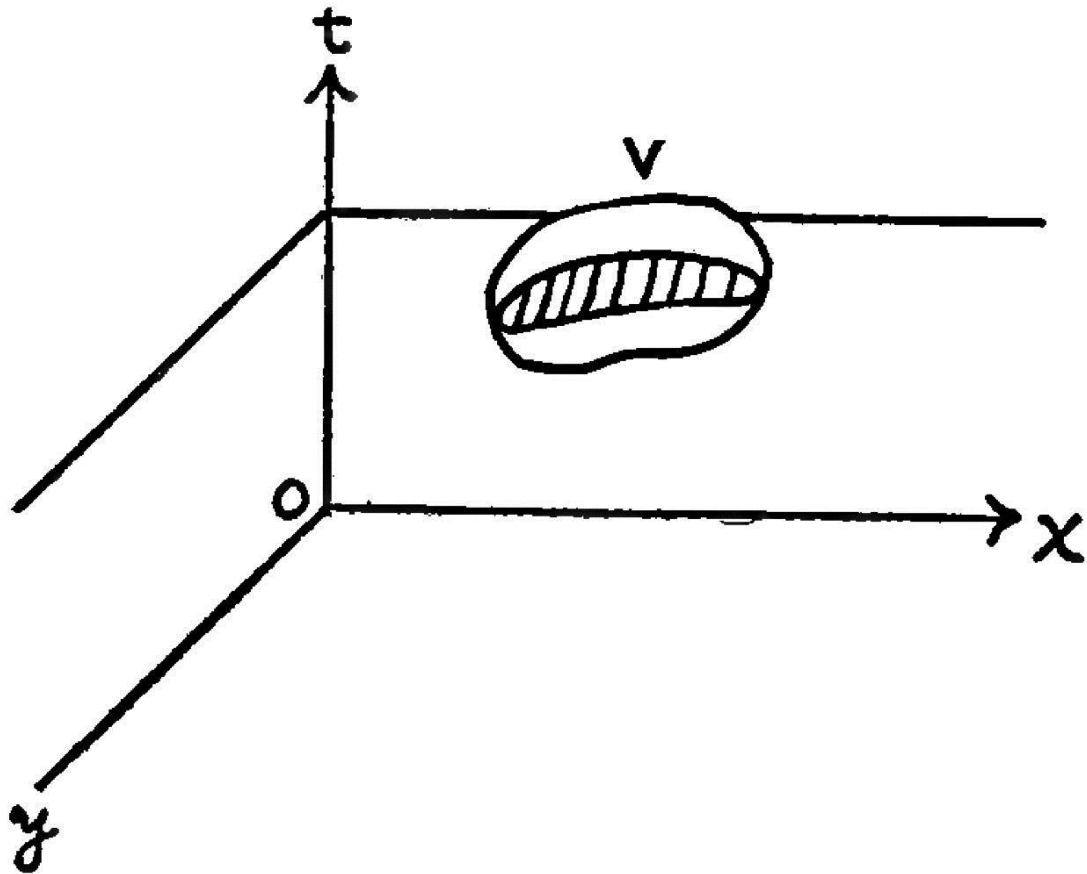


Рис. VII

Предположим, что в этом блоке пространства-времени мы рассматриваем объем красного цвета. Если мы предположим, что наша собственная мировая линия задана формулой ot , то наше мгновенное настоящее будет всегда задано неопределенной плоскостью, параллельной xoy . Поскольку наше существование в каждый момент времени представлено последовательными точками вдоль ot , наше мгновенное настоящее будет постепенно подниматься, пересекая красный объем V вдоль последовательных плоских областей ([рис. VII](#)). Таким образом, мы можем сказать, что с точки зрения пространства и времени красный объем пространства-времени выглядит как брызги красного цвета, извивающиеся и меняющие форму, несмотря на то, что с точки зрения пространства-времени объем является фиксированным и неподвижным. Но изменяющаяся форма красного пятна, как описано выше, соответствует пятну, как оно существует в нашем мгновенном настоящем. Это не то, что мы воспринимаем нашими глазами, потому что все, что мы воспринимаем, уже находится в нашем прошлом. Следовательно, то, что мы воспринимаем в данный момент, будет определяться не пересечением красного объема с плоскостью нашего мгновенного настоящего, а его пересечением с поверхностью нашего мгновенного конуса пассивного прошлого ([рис. VIII](#)). Это световой конус, который проходит через те пространственно-временные события, которые находятся в нашем настоящем поле зрения. Все остальные события с визуальной точки зрения находятся либо в нашем визуальном прошлом, либо в будущем. (Более подробные объяснения будут приведены в [Приложении I](#).)

Оглядываясь на то, что было достигнуто, мы видим, что движение и изменение, с которыми мы знакомы в нашей повседневной жизни, теперь интерпретируются как результат прохождения нашего сознания через пространство-время. Причина этого прохождения остается совершенно загадочной; но, как мы уже говорили, отнести ее к

динамическим свойствам самого континуума — динамическим свойствам, которые подталкивают наше сознание вперед, — не решит наших проблем. Даже если бы это решение было принято, причина динамических свойств и их воздействие на наше сознание остались бы такими же загадочными, как и прежде.

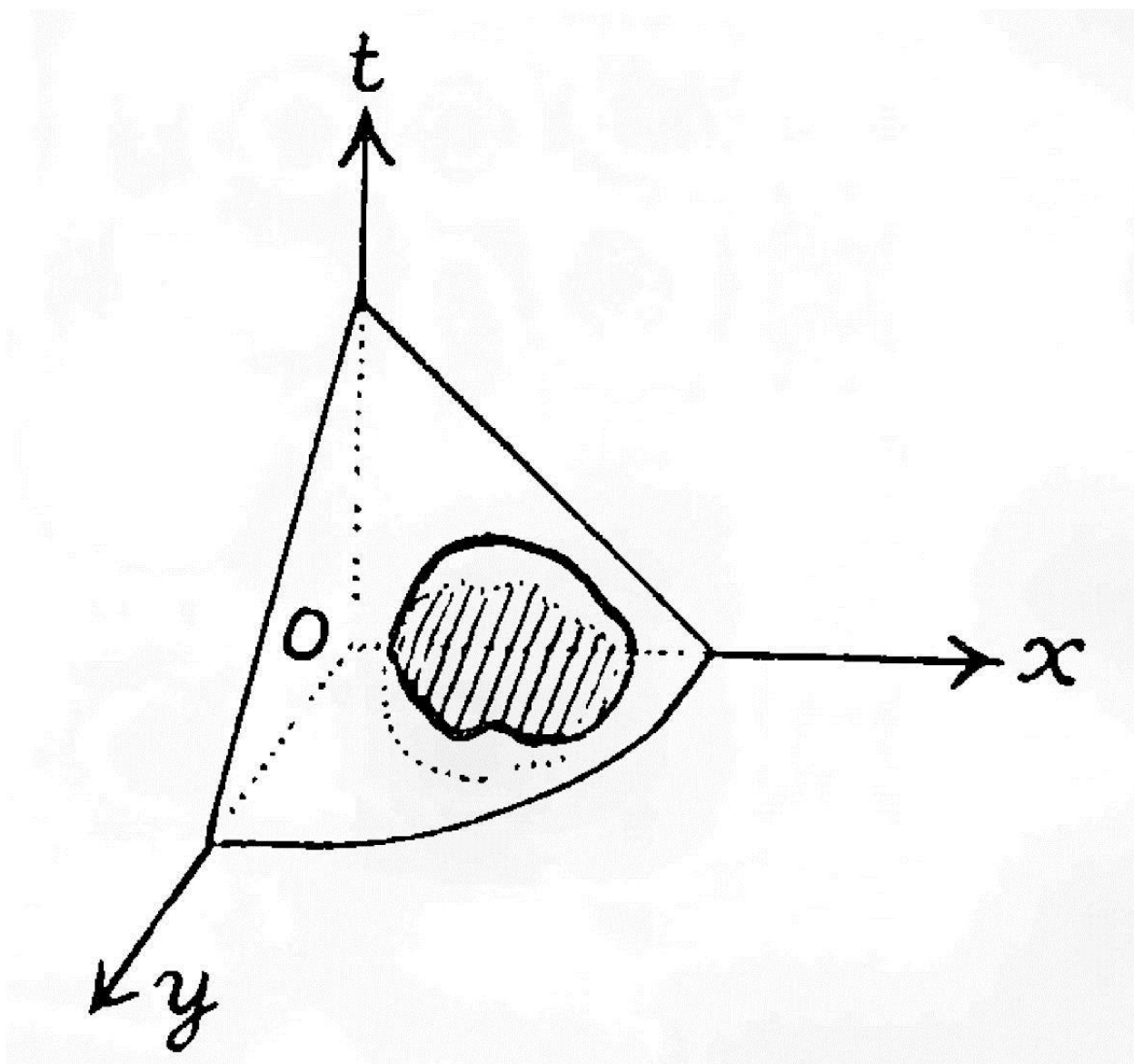


Рис. VIII

В этой интерпретации пространства-времени нет места для свободы воли, поскольку все уже предопределено и существует в будущем. Безусловно, это наиболее неудовлетворительный аспект данной концепции. Но как его избежать? В классической науке мы всегда могли оставить место для свободы воли, предполагая, что только настоящее и прошлое полностью предопределены, а будущее может быть изменено по желанию. Но в теории относительности такое четкое разделение больше невозможно. Ведь если мы рассмотрим двух наблюдателей, проходящих мимо друг друга, настоящее одного из них включает в себя как прошлое, так и будущее другого. Следовательно, мы не можем избавиться от будущего, не уничтожив при этом часть прошлого вместе с настоящим, или, по крайней мере, ту часть настоящего, которая находится не в непосредственной близости от нас. Мы также не можем смело предполагать, что местонахождение свободы воли находится в каком-то сверхчувственном мире, превосходящем пространство-время, поскольку положение объекта на столе, в конце концов, является результатом воли, которая

поместила его туда, а тело как материальный объект занимает положение в пространстве-времени.

В любом случае, кажется, что нет особого смысла размышлять над загадками такого рода. Дело в том, что наука по необходимости является детерминистской, не из-за акта веры, не потому, что она убедила себя в несуществовании свободной воли, а потому, что детерминизм является для науки крайней необходимостью, если явления должны быть скоординированы и связаны друг с другом. Независимо от того, что может принести будущее, физик вынужден действовать так, как будто в природе существует жесткая детерминированная схема, и рассматривать пространство-время и его содержание как данность, даже если он может сомневаться в том, что это действительно так.

Интересные побочные аспекты причинности предлагает теория пространства-времени. Поскольку никакие эффекты не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света, течение времени является необходимым условием для действия причинно-следственных связей. Это не обязательно было верно, когда рассматривались мгновенные эффекты (или действие на расстоянии). Таким образом, теория относительности налагает ограничения на причинно-следственные связи; она позволяет нам утверждать, что между определенными пространственно-временными событиями не может существовать никаких причинно-следственных связей. Однако следует отметить, что категория причинности не имеет места в пространстве-времени как таковом. Причинность можно рассматривать только с точки зрения восприятия наблюдателя, поскольку только в этом случае вводится понятие прохождения времени. Поэтому при обсуждении пространства-времени с безличной точки зрения как статического четырехмерного континуума предпочтительнее говорить о функциональных отношениях.

Следующий важный аспект теории относительности, который мы должны рассмотреть, касается нашего представления о реальном пространстве. Мы помним, что геометрическое пространство математики было аморфным. Оно не обладало внутренней метрикой, особой геометрией, размером, формой; и геометрия, которую математик приписывал пространству, была чисто делом выбора. С другой стороны, реальное пространство физики, казалось, обладало определенной метрикой. Кроме того, аморфная природа пространства опровергалась существованием центробежных сил и т. п., доказывая, что не все движения в пространстве были эквивалентны.

Когда дело дошло до определения точной геометрии реального пространства, можно было рассмотреть различные методы. Мы могли бы пойти по пути обращения к твердым телам, то есть к телам, которые визуально и тактильно казались одинаковыми, где бы мы их ни переносили. В более общем плане, твердые тела считались материальными телами, поддерживаемыми, насколько это возможно, в постоянных условиях температуры и давления. Мы также могли бы исследовать пространство с помощью лучей света, предполагая, что их траектории *в вакууме* определяют геодезические линии. Более века назад Гаусс предпринял попытки проведения подобных экспериментов между вершинами двух гор. Еще более общий метод заключался в использовании законов физики в целом и определении типа геометрии, который необходимо было бы приписать пространству, чтобы мы могли с максимальной простотой координировать природные явления. Этот подход был предложен Риманом в 1854 году в его инаугурационной речи в Гёттингене.

Следует отметить, что все эти различные методы определения геометрии пространства являются по сути физическими. Поэтому всегда можно было бы выдвинуть обвинение, как это и сделал Пуанкаре, что все, что мы могли бы определить таким образом, сводилось бы к геометрическим свойствам материальных тел или лучей света, а само пространство было

бы аморфным и поэтому полностью ускользало бы от нас. С другой стороны, неоспоримым фактом опыта было то, что измерения в евклидовом пространстве (), проводимые с помощью материальных стержней или лучей света, всегда давали одинаковые евклидовы результаты. Кроме того, та же евклидова геометрия, казалось, накладывалась на пространство, когда мы пытались интерпретировать законы физики самым простым способом. Было трудно представить, что это общее согласие результатов, полученных с помощью различных методов подхода, можно было бы объяснить случайностью. Следовательно, проблема была решена, и возникла вера в то, что само пространство обладает евклидовой структурой и что именно эта структура контролирует поведение материальных твердых тел, траектории лучей света и движение свободных тел, удаленных от материи, в соответствии с законом инерции. Когда была принята эта точка зрения, значение измерений с помощью материальных стержней изменилось. Геометрия пространства была не просто евклидовой геометрией материальных тел; скорее, было наоборот. Геометрия материальных тел была евклидовой в силу этой ранее существовавшей евклидовой структуры пространства, которая придавала им форму и тем самым наделяла их геометрическими свойствами. В этих условиях измерения в пространстве с помощью твердых тел и лучей света сводились к исследованию ранее существовавшей геометрии пространства, и роль твердого тела и луча света стала схожей с ролью термометра в обнаружении ранее существовавших колебаний температуры.

Теперь это отношение к поведению жестких стержней и лучей света как к симптомам, а не как к причинам, не должно затмевать тот факт, что стержни, лучи света и физические явления в целом являются необходимым условием для открытия ранее существовавшей структуры пространства. Поэтому нет смысла пытаться определить эту структуру *априори* под предлогом того, что физические измерения, какими бы совершенными они ни были, никогда не могут выйти за пределы определенной приблизительности и поэтому не имеют никакой ценности для обнаружения точной структуры пространства. Мы никогда не должны забывать, что здесь мы имеем дело с проблемой физики, а не с проблемой чистой математики. Например, в евклидовой геометрии математику не нужно прибегать к измерениям с помощью жестких стержней, чтобы определить значение π , поскольку в силу наших основных евклидовых постулатов и правил логического мышления π можно определить с любой степенью точности с помощью чисто математических средств. Но в случае геометрии физического пространства мы полностью теряемся. *Априори* эта геометрия может быть одной из множества различных типов. Все, что мы можем сделать, это утверждать, что принцип достаточного основания заставляет нас рассматривать физическое пространство как однородное и изотропное, а значит, сводящееся к геометрии с постоянной кривизной, будь то евклидова или нет. Даже это убеждение будет подвергаться сомнению, пока мы не узнаем больше о происхождении этой структуры. В любом случае, *априори* точная геометрия пространства никогда не может быть установлена. Нравится нам это или нет, мы вынуждены прибегать к стержням, лучам света и физическим методам исследования; и любая геометрия, полученная таким образом, *ipso facto* станет геометрией реального физического пространства с точностью наших измерений.

До этого момента мы ограничивались обсуждением первого шага в нашем исследовании физического пространства. Структура рассматривается как уже существующая; и наши стержни и лучи света, приспособившись к этой структуре, позволяют нам, так сказать, объективировать ее. Подобным образом, цветная жидкость, налитая в идеально прозрачный стакан (настолько прозрачный, что его не видно), позволяет нам определить внутреннюю форму стакана. Но теперь мы переходим ко второму шагу. Что является

причиной этой структуры? Поставлена ли она Создателем как неотъемлемое свойство пространства, или же она является лишь проявлением чего-то более фундаментального?

Риманн отказывался верить, что структура пустоты может существовать сама по себе. Он признавал, как и раньше, что наши стержни приспособляются и таким образом раскрывают уже существующую структуру, но эта структура, в свою очередь, должна быть создана и обусловлена чем-то другим, чуждым пустоте. Для объяснения этого «чего-то другого» Риман обратился к силам, генерируемым огромной массой совокупности распределения звезд. Отсюда следует, что если бы во Вселенной не было звезд и материи, кроме наших исследовательских стержней, никакая геометрия не была бы раскрыта. Стержни не знали бы, как действовать; лучи света не знали бы, куда идти; физическое пространство было бы немыслимо. С этой смелой идеей Римана однородность и изотропность пространства (евклидова или неевклидова), которые ранее считались навязанными принципом достаточного основания, больше не были неизбежными, поскольку звездная материя, порождающая причина этой структуры, не была равномерно распределена по всей вселенной. Поэтому Риман считал, что в пространстве может присутствовать изменяющийся неевклидов характер. Путь и лучи света, конечно, приспособились бы к этой неоднородной структуре, давая разные числовые результаты в разных местах пространства.

Все эти теории предшествовали открытиям Эйнштейна на много лет, но с появлением теории относительности вся проблема предстала в новом свете, с той лишь разницей, что фундаментальным континуумом, подлежащим исследованию, было четырехмерное пространство-время, а не трехмерное пространство. Введение пространства-времени потребовало обращения к хронометрам или вибрирующим атомам, а также к материальным стержням, хотя продвижение лучей света через пространство также могло служить для измерения продолжительности (благодаря постулату об инвариантной скорости света, согласно которому луч света описывает равные пространства за равное время). В любом случае, определения времени должны были бы давать одинаковые результаты, независимо от того, рассчитывались ли они по лучам света или по колебаниям атомов, поскольку в противном случае нам пришлось бы предположить, что сама структура пространства-времени не может быть определяющим и формирующим фактором, регулирующим поведение материальных тел и всех процессов изменения. В этом случае вера в структуру пространства или пространства-времени была бы трудноприемлемой. Эта структура пространства-времени получила различные названия. Вейль называет ее *аффинной связью*, *направляющим полем* или *метрическим полем*. Эйнштейн называет ее *эфиром пространства-времени* или *гравитационным эфиром*. Чтобы избежать путаницы с неподвижным эфиром классической науки, от которого она отличается во многих отношениях, мы будем называть ее «метрическим полем» (). Математически, как мы знаем, она представлена распределением Эйнштейна-Метцгера (g_{ik}).

Следует отметить, что, поскольку пространство-время может быть разделено на пространство и время любым наблюдателем (по крайней мере, в его непосредственной близости), структура пространства-времени автоматически разделится на структуру пространства и структуру времени, или пространственное и временное метрическое поле. Поведение стержней и тел, находящихся в покое по отношению к наблюдателю, будет контролироваться пространственной структурой, в то время как биения идеальных часов, таких как вибрирующие атомы, будут контролироваться временной структурой. Если рассматривать пространство и время вместе, можно сказать, что разницу между пространством-временем и отдельными пространством и временем можно выразить следующим образом: в то время как трехмерное евклидово пространство классической

науки можно было рассматривать как расщепленное параллельными временными стратификациями, определяющими пространственно-временные ситуации одновременных событий и четко отделяющими пространство от времени, в пространстве-времени такой стратификации не существует. Если мы хотим придерживаться старой концепции, мы все еще можем говорить о временных стратификациях через пространство-время, но мы должны быть осторожны и добавить, что эти стратификации не проявляют фиксированного направления. Это связано с тем, что те стратификации, которые были бы временными стратификациями, определяющими одновременные события для одного наблюдателя, перестали бы быть временными стратификациями, определяющими одновременные события для другого наблюдателя, находящегося в относительном движении. Относительность одновременности — это лишь другой способ выражения тех же фактов. Но, конечно, с этим признанием концепция временных стратификаций теряет всякое глубокое значение. Отсюда следует, что при обсуждении структуры пространства-времени было бы предпочтительнее не упоминать такие относительные понятия, как пространство и время. Соответственно, мы скажем, что структура пространства-времени определяется световым конусом, то есть местом нахождения мировых линий световых лучей, исходящих из любой заданной точки в любой заданный момент времени. Именно этот световой конус разделит пространство-время на допустимые пространственные и временные направления.

[\[161\]](#)

Вернемся к метрическому полю, определяющему структуру пространства-времени. Хотя Риман приписывал существование структуры, или метрического поля, пространства связывающим силам материи, в специальной теории Эйнштейна нет ни малейшего указания на то, что такая точка зрения будет развита позже; более того, не похоже, что Эйнштейн был хоть в малейшей степени подвержен влиянию идей Римана. В любом случае, в специальной теории проблема определения происхождения структуры, или поля, ее сущности и причин даже не обсуждается в предварительном порядке. Пространство-время с его плоской структурой предполагается данным или постулируемым Творцом.

Но в общей теории вся ситуация меняется, когда Эйнштейн объясняет гравитацию, а значит, и изменяющееся состояние метрического поля, с точки зрения изменяющейся неевклидовой структуры пространства-времени вокруг материи. Тогда мы вынуждены признать не только то, что метрическое поле регулирует поведение материальных тел и часов, как это было и в специальной теории, но и то, что происходит взаимное воздействие и что материя и энергия, в свою очередь, должны влиять на расположение метрического поля (). Но мы все еще далеки от взгляда Римана, согласно которому поле не только подвергается воздействию, но и создается материей; и только когда мы рассматриваем космологическую часть теории Эйнштейна, эта идея Римана кажется оправданной.

И здесь мы приходим к расхождению во мнениях: с одной стороны, де Ситтер и Эддингтон, с другой — Эйнштейн и Тирринг, а Вейль находится где-то между этими двумя крайностями. Разногласия возникают из-за различий во взглядах на вопрос о происхождении метрического поля. Невозможно принять общую теорию Эйнштейна, не признавая, что поле регулирует поведение материи и все процессы изменения и, в свою очередь, подвергается воздействию материи, поддающейся его влиянию; но вопрос заключается в том, создается ли это поле или структура пространства-времени полностью материей, или же какая-то структура существовала бы и в отсутствие материи.

Рассматривая форму Вселенной, мы видели, что если принять сферическую Вселенную де Ситтера или бесконечную квазиэвклидову Вселенную, поскольку обе они могут существовать при полном отсутствии материи, мы должны сделать вывод, что метрическое поле явно не создается материей. С другой стороны, если мы примем цилиндрическую

вселенную Эйнштейна, необходимость которой обусловлена видимой стабильностью распределения звезд, то обнаруживается прямая зависимость между размером и геометрией вселенной и наличием материи. Однако не обязательно соглашаться с Эйнштейном в том, что материя создает поле. Мы также можем согласиться с Эддингтоном в том, что именно поле создает материю.^[162] Если принять точку зрения Эддингтона, то то, что наши чувства воспринимают как материю, состоит из определенных искривлений метрического поля. Если бы вселенная сжималась, определенное количество материи было бы уничтожено; если бы она расширялась, соответствующее количество материи было бы создано. Если мы принимаем точку зрения Эйнштейна, то все наоборот. Большее количество материи привело бы к расширению Вселенной, а уничтожение материи — к ее сжатию. Мы видели, что Вселенная Эйнштейна, по-видимому, находится в полной гармонии с верой Маха в радикальную относительность вращения по отношению к звездам и в отношенческую природу массы. Так же как классическая наука признавала, что вес обусловлен близостью других тел, так и Мах и Эйнштейн считают, что аналогичные соображения должны быть распространены на массу. Это тот же вечный конфликт между теми, кто, как Максвелл и Фарадей, придерживается чистой физики поля, возвышая электромагнитное поле над электричеством и магнетизмом как таковыми, и теми, кто, как Лоренц, возвышает материальный электрон над полем или, по крайней мере, считает поле и электрон реальностями одинаковой важности, но разных категорий.

С точки зрения методологии существует интересное различие между специальной и общей теориями. В специальной теории структура пространства-времени исследуется физическими средствами. Именно евклидово поведение наших стержней, поведение наших часов и, наконец, прямолинейные траектории и постоянная инвариантная скорость лучей света указывают на то, что структура должна быть плоской или полуевклидовой, по крайней мере, насколько позволяет утверждать точность наших наблюдений. Теоретически тот же физический метод исследования мог бы быть продолжен вблизи больших масс материи. Но следует помнить, что с помощью этих методов мы никогда не смогли бы исследовать области пространства-времени внутри материи. Кроме того, как можно заключить из незначительности таких эффектов, как изгиб луча света, проходящего вблизи Солнца, и из неуловимости эффекта Эйнштейна, мы теперь знаем, что отклонения от плоскости, безусловно, чрезвычайно малы. В этих условиях было бы чрезвычайно рискованно приписывать неевклидовости пространства-времени эффекты, которые также можно было бы объяснить случайными физическими влияниями.

Кроме того, даже в случае падающих тел, которые описывают эллипсы или параболы, сильно отклоняющиеся от прямых траекторий, покрытых постоянными скоростями, до тех пор, пока обычная ньютоновская сила притяжения считалась ответственной за эти отклонения, не было никаких особых причин приписывать их неевклидовости пространства-времени. Только после того, как Эйнштейн убедился, что изменение структуры пространства-времени не может не существовать вокруг материи, появился новый математический метод для определения структуры до начала всех физических исследований. Мы видели, что этот метод был математически сформулирован общим принципом относительности, согласно которому все законы природы, и в частности закон гравитации, должны быть выражены тензорными уравнениями.

Теперь очень важно понять, что, хотя в случае структуры пространства-времени, или метрического поля, метод открытия отличается в специальной и общей теориях, значение структуры, однажды определенное, остается точно таким же. В любом случае именно структура определяет поведение стержней и часов и направляет ход лучей света и тел, падающих по геодезическим линиям; поэтому, хотя общая структура не была открыта с

помощью прямых физических измерений, теоретически она должна была быть открыта, если бы наши измерения были более точными. Таким образом, проверка теории относительности состоит в том, чтобы обнаружить, покажут ли сверхточные измерения с помощью стержней, часов, лучей света и свободных тел структуру, заранее определенную Эйнштейном. Мы знаем, что движение Меркурия и двойное изгибание луча света подтвердили предсказания Эйнштейна. Но для двойной уверенности нам также необходимы измерения с помощью стержней и часов. К сожалению, с помощью стержней проверка совершенно невозможна из-за крошечных отклонений от евклидовой геометрии вокруг материи; но с помощью часов проверка должна быть возможна, если обратиться к колебаниям раскаленных атомов. Именно по этой причине обнаружение эффекта Эйнштейна считалось столь важным. Если бы было доказано, что этого сдвига не существует, теория рухнула бы. Ее можно было бы спасти, предположив, что атом не приспособливает частоту своих колебаний к искривлению времени структуры, или, другими словами, не ведет себя как идеальные часы. Но, как каждый поймет, если бы был выбран этот путь спасения, вся красота теории исчезла бы вместе с ее способностью позволять нам предсказывать и предвидеть. Какое значение имело бы это знание о структуре вокруг материи, если бы, помимо прочего, оно не привело к приведению временной скорости всех процессов изменения в соответствие с ее искривлением? В любом случае, Эйнштейн задолго до того, как эффект сдвига был наконец наблюден на спутнике Сириуса, заявил, что он откажется от теории, если сдвиг окажется несуществующим. К счастью для этой прекрасной теории, такой поворот событий теперь исключен.

Дальнейшие проверки структуры будут связаны с исследованиями с помощью стержней и часов во внутренней части материи. Но, как можно понять, исследования такого рода чрезвычайно сложны, и на данный момент мы должны довольствоваться теоретическими прогнозами Эйнштейна в этом отношении.

Когда мы подходим к форме Вселенной, а значит, к пространственно-временной структуре Вселенной в целом, теоретически снова физические исследования должны дать нам эту структуру. Например, луч света должен обходить Вселенную по кругу, а движения звезд в Млечном Пути и планет в Солнечной системе должны зависеть от вселенской кривизны. Но, опять же, ввиду сложности прямых физических исследований, пришлось прибегнуть к математическим методам; и, как мы видели, Эйнштейн обратился к закону структурного тензора кривизны, который был бы совместим со стабильным внешним видом созвездий. Таким образом, он получил цилиндрическую Вселенную. Если принять этот закон, пространство-время никогда не бывает идеально плоским; плоское континуум специальной теории становится идеальным предельным случаем.

В теории относительности концепция материи также претерпевает важные изменения. В классической науке материя отличалась своим свойством массы и способностью создавать гравитационное поле. Правда, было известно, что электромагнитное поле также обладает импульсом и, следовательно, инерцией (что иллюстрируется давлением света), так что даже в классической науке различие между материей и эфиром теряло свою определенность. Однако из-за фундаментального различия, которое, как считалось, существовало между инерционной массой, как представителем инерции, и гравитационной массой, как представителем притяжения, электромагнитное поле никогда не подозревалось в создании гравитационного поля. Следовательно, различие между материей и энергией оставалось довольно ясным. Теория Эйнштейна, отождествляя массу и энергию и показывая, что все формы энергии способны создавать гравитационное поле, делает это различие менее обоснованным. Еще одним следствием этой теории стало доказательство того, что закон

сохранения материи не может действовать. В результате масса как вещество теряет свое значение.

Переходя к законам движения, мы помним, что существует только один закон: все свободные тела (при сведении к точечным массам) следуют временным геодезическим линиям в пространстве-времени, независимо от того, является ли пространство-время плоским, как это (по крайней мере, приблизительно) в межзвездном пространстве (), или искривленным из-за присутствия материи. Если пространство-время плоское, геодезические линии прямые, и тела описывают прямые траектории с постоянной скоростью по отношению к галилеевой системе отсчета. Таким образом, закон инерции Ньютона выражает плоскость пространства-времени. Когда пространство-время, а значит и его геодезические линии, искривлены присутствием материи, траектории свободных тел кажутся искривленными, или же их движение ускоряется. Но в то время как в классической науке в этих условиях закон инерции был неверным и приходилось вводить дополнительное гравитационное влияние, в теории Эйнштейна общий закон геодезического движения по-прежнему остается верным. Поскольку структура пространства-времени определяет законы нашей геометрии, биение природных часов (атомов) и движение свободных тел, мы видим, что эта теория привела к слиянию геометрии и физики.

Мы также можем вспомнить, что существование пространства-времени решило старую загадку двойственной природы структуры пространства в механике, кажущейся относительной для скорости и абсолютной для ускорения (см. [главу XIX](#)).

Сила — еще одно важное понятие, на которое теория относительности пролила новый свет; однако, чтобы избежать недоразумений, мы можем уточнить, что под силой мы имеем в виду не мышечные усилия, а силы гравитации, инерции и электромагнитного поля. Вспомним, как были получены новые идеи. Мы видели, что фундаментальным континуумом мира является пространство-время и что наблюдатели, в зависимости от своих относительных движений, разбивают его на пространство и время различными способами. Теперь мы знаем, что даже в плоском пространстве-времени, вдали от материи, силы инерции возникают, когда мы помещаем себя во вращающуюся систему отсчета или, более обще, в любую ускоренную систему отсчета; в терминах пространства-времени это означает, что когда мы разделяем пространство-время на искривленное пространство и искривленное время.

Из этого следует, что в пустой области плоского пространства-времени нет смысла задаваться вопросом о наличии или отсутствии сил. Силы могут возникать только после того, как произошло разделение пространства-времени на отдельное пространство и время. Затем, в соответствии с выбранным методом, силы будут казаться распределенными так или иначе, или даже могут не возникать вовсе; последний случай будет соответствовать выбору декартовой системы координат. Но этот процесс разделения, который может привести к возникновению сил, явно искусственен и не соответствует ничему внутреннему в природе, так же как разделение трехмерного пространства на произвольные направления, которые мы называем верх, низ, лево и право, не раскрывает никаких внутренних свойств пространства. Таким образом, мы видим, что силы вводятся наблюдателем и что в одной и той же области пространства-времени они могут присутствовать для одного человека и отсутствовать для другого. Поэтому мы не можем приписывать им какое-либо абсолютное существование, выходящее за пределы наблюдателя.

Теперь силы, о которых мы говорили, были теми, которые могли возникать в плоском пространстве-времени вдали от материи. Это были силы инерции классической науки, и их

часто называли фиктивными именно потому, что их существование зависело от наших условий наблюдения. Затем было проведено различие между этими фиктивными силами и силой гравитации, которая, как предполагалось, существовала вокруг материи независимо от системы отсчета наблюдателя. Но с появлением теории относительности мы видим, что такое различие больше не допустимо. Вокруг материи пространство-время проявляет кривизну, но, как и в случае плоского пространства-времени, наблюдатель может разделить его на пространство и время таким образом, что никакая сила не будет проявляться, по крайней мере, в его окрестностях. Этот метод разделения, как мы знаем, соответствует методу наблюдателя, падающего свободно, следовательно, следующего геодезической линии в пространстве-времени. Если, таким образом, силы инерции должны рассматриваться как фиктивные, то то же самое следует делать и с силами гравитации. То же самое относится и к электромагнитным силам. Здесь также интенсивность и природа поля (электрического, магнитного или электромагнитного) в значительной степени зависят от условий наблюдения.

Смысл всех этих обсуждений заключается в том, что если мы хотим сформировать беспристрастную картину Вселенной, то в ней нет места силам гравитации или инерции, поскольку эти силы вводятся наблюдателем. Точно так же в описании памятника нет места тени, поскольку тень вводится только солнцем, а что касается самого памятника, то солнце и свет в целом не являются необходимыми условиями его существования. Вся философия теории относительности заключается в отделении сущностей, которые не имеют значения, кроме как для выражения отношений к системе отсчета наблюдателя, от сущностей, которые можно представить как постоянные, независимо от присутствия наблюдателя. Мы признаем эти абсолютные сущности как те, которые остаются неизменными для всех наблюдателей. Математически они выражаются инвариантами и тензорами в пространстве-времени. Действие и интервал Эйнштейна являются представителями инвариантов, в то время как большинство типов искривления пространства-времени, тензоры электромагнитного поля и тензор материи являются представителями тензоров. Именно потому, что гравитационная сила и потенциальная энергия не представлены тензорами, мы не можем придавать им абсолютного значения; в результате потенциальная энергия отбрасывается как относительная, и закон сохранения энергии теряет смысл.

Описанное нами отношение к гравитационной силе особенно активно отстаивает Эддингтон. Вейль, однако, смотрит на эту проблему иначе. Он утверждает, что метрическое поле пространства-времени связано с материей так же, как электрическое поле связано с электричеством. Так же как электрическая сила является реальной силой, создаваемой электрическим полем на заряженном теле, так и инерционные и гравитационные силы должны рассматриваться в том же свете, поскольку они возникают в результате воздействия метрического или направляющего поля на материю. Но следует понимать, что концепция силы Вейля не совсем совпадает с общепринятой. Например, согласно взглядам классической науки, тело, движущееся в межзвездном пространстве в соответствии с законом инерции, не подвергается никаким силам. Оно движется в соответствии с принципом инерции, и не возникает вопроса, почему оно движется по прямой линии, а не по кривой. Хотя даже в классической науке было очевидно, что должно существовать направляющее влияние, исходящее из самого пространства, о его природе говорилось очень мало.

Именно важность этого «направляющего поля» подчеркивает Вейль. Именно это динамическое свойство пространства или пространства-времени было полностью раскрыто теорией относительности. Направляющее поле, или метрическое поле, как мы знаем,

представлено распределением Эйнштейна, и, по мнению Эйнштейна, его происхождение, по всей вероятности, следует искать в наличии всеобщих масс. Цитируем Вейля:

«Принцип инерции Галилея показывает, что существует своего рода «насилованное руководство», которое заставляет тело, движущееся с определенной скоростью, двигаться определенным образом, который может быть изменен только внешними силами. Это «направляющее поле», которое является физически реальным, выше называлось «аффинным отношением». Когда тело отклоняется внешними силами, руководство силами, такими как центробежная реакция, утверждает себя».

Эти соображения, касающиеся тензоров, приводят нас, в свою очередь, к пониманию значения законов природы. Специальная теория, продемонстрировав тождество инвариантной скорости пространственно-временного мира с постоянной Максвелла, доказала, что законы природы остаются ковариантными по отношению к преобразованиям Лоренца-Эйнштейна. Это было лишь другим способом сказать, что они выражают отношения между векторами и тензорами в плоском пространстве-времени, по крайней мере, в том, что касается галилеевых наблюдателей. Общая теория расширяет это открытие, предполагая, что оно справедливо для всех наблюдателей, независимо от их системы отсчета и независимо от того, является ли пространство-время плоским или искривленным. Таким образом, мы получаем общий принцип относительности, или ковариантности, который выражает условия, которым должны удовлетворять все законы природы. Те, которые не проходят эту проверку, больше не могут считаться истинными законами.

Мы также можем подойти к проблеме законов природы дедуктивным путем, исходя из пространства-времени. Как только мы признаем существование абсолютной вселенной, лежащей в основе нашего пространственного и временного мира непосредственного восприятия, и как только мы осознаем, что изменения в нашем движении соответствуют лишь различиям в наших методах разделения пространственно-временного континуума на пространство и время, становится очевидным, что все особенности структуры абсолютной вселенной будут сохраняться независимо от нашего выбора системы координат и, следовательно, независимо от нашего движения. Эти абсолютные пространственно-временные отношения соответствуют законам природы, которые выходят за пределы движения наблюдателя. Отсюда следует, что существование абсолютной вселенной, в которой наши физические объекты представлены векторами и тензорами, и относительность всех движений, что касается выражения законов природы, являются лишь альтернативными аспектами одного и того же состояния; так что, как мы уже имели возможность отметить, теория относительности может также называться «поиском абсолюта».

И здесь следует упомянуть довольно любопытный момент в теории Эйнштейна. Классическая наука, казалось, установила почти без тени сомнения, что описание явлений с точки зрения инерциальной системы Коперника стало окончательным; поскольку, когда мы пытались выразить явления с точки зрения вращающихся систем, мы были вынуждены усложнять форму наших законов, вводя центробежные и кориолисовы силовые поля. Но это оставалось верным только до тех пор, пока мы рассуждали в терминах отдельного пространства и времени. В пространстве-времени законы природы принимают неизменные формы, так что математические соотношения больше не изменяются, когда мы переходим от инерциальной системы отсчета к вращающейся. Дело не в том, что центробежные и кориолисовы силы не проявляются, когда мы переходим от галилеевой к вращающейся системе отсчета, а в том, что их больше не нужно вводить как посторонние добавки, поскольку они уже содержатся в латентной форме в математическом выражении законов. Тогда математические правила преобразования, которые соответствуют переходу от одной

системы отсчета к другой, скажем, от галилеевой к вращающейся, заставляют эти силы автоматически переходить из латентной формы в активную.

Эвристическая ценность этого нового аспекта законов природы, конечно, значительна. В классической науке законы всегда были тензорными уравнениями в отдельном пространстве и времени; но теория относительности, заставляя нас заменять пространство пространством-временем, заметно сужает наш выбор законов. Таким образом, в классической науке закон гравитации мог быть практически любым; он мог быть, например, законом обратной кубической зависимости; только наблюдение за движением планет могло решить, какой закон — Ньютона или какой-либо другой — является верным. Но с критерием пространства-времени ряд возможных законов, включая закон обратной квадратичной зависимости Ньютона и законы классической механики, отбрасываются как невозможные *ab initio*.

Здесь, однако, необходимо правильно понять ограничения, которые принцип ковариантности, или общий принцип относительности, налагает на законы природы. Сам по себе факт, что все законы природы должны быть выражены в форме пространственно-временного тензора, не является достаточным для их однозначного определения.^[163] Введя в законы гравитации достаточное количество произвольных тензоров, существование которых мы постулировали бы *ad hoc*, мы могли бы, по-видимому, варьировать закон *до бесконечности*, сохраняя его свойства ковариантности. Более того, даже без введения посторонних тензоров принцип ковариантности не ограничивает закон гравитации той простейшей формой, которую выбрал Эйнштейн ($G_{ik} = 0$ для бесконечной вселенной или с дополнительным членом λ для конечной вселенной). Мы неоднократно упоминали, что более сложные законы также возможны, если мы готовы рассматривать те из них, которые включают производные потенциалов более высокого порядка, чем второй.

Тем не менее, несмотря на эти различные возможности, принцип ковариантности позволяет нам сузить выбор допустимых законов; поэтому он сохраняет значительную эвристическую ценность. И именно благодаря этому принципу Эйнштейн, как мы помним, смог сформулировать простейший из возможных законов гравитации еще до того, как были получены результаты экспериментов и точных наблюдений.

Мы также можем отметить, что общий принцип относительности не означает, что все наблюдатели находятся в равных условиях. Незначимость наблюдателя () имеет место только в том, что касается математического выражения законов природы; и было бы неверно предполагать, что вращающийся наблюдатель мог бы обмануть себя, полагая, что он находится в покое в галилеевой системе отсчета, или что человек, бросаемый из стороны в сторону в каюте корабля, мог бы предположить, что море совершенно спокойно.

Короче говоря, мы видим, что общий принцип относительности имеет в основном математическое и формальное значение; абсолютность вращения остается, как и прежде, эмпирическим фактом, от которого мы не можем отмахнуться. Только когда мы принимаем гипотезу о цилиндрической вселенной, допускаемую, но не обязательную по общему принципу, становится возможной относительность всех движений в маховском смысле.

В этой книге мы попытались перечислить наиболее важные особенности работы Эйнштейна. Конечно, есть ряд аспектов, которые невозможно упомянуть из-за высокотехнических аргументов, которые они повлекли бы за собой. Тем не менее, из того немногого, что было сказано, можно сделать некоторые общие выводы.

Теория относительности научила нас, что, как ни странно, в мире физики нет ничего, что оправдывало бы наше естественное убеждение в отдельности пространства и времени. Именно это открытие, повлекшее за собой открытие четырехмерного мира пространства-времени, составляет наиболее важный вклад теории в наше знание о Вселенной. Дополнительную значимость четырехмерному миру придает тот факт, что объекты, с которыми работают физики, оказываются векторами и тензорами в его субстанции, а не в субстанции какого-то другого мира. Это само по себе придает пространству-времени физическую реальность и устраняет из него всякую вымысленность.

Помимо существования пространства-времени и его инвариантных интервалов, действительно новые взгляды, которые навязывает нам теория, заключаются в относительности таких первичных понятий, как длина, продолжительность, одновременность, масса, сила и т. д., к которым следует добавить также температуру. Мы также получаем новые взгляды на причинно-следственные связи и лучшее понимание принципа действия и принципов сохранения. Материя сливается с энергией и исчезает как субстанция, а сохранение не является строгим. Более того, материя, возможно, создает пространство-время, и все движение может быть относительным. Что касается массы, то она может быть полностью относительной по своей природе, как и вес.

Если мы ограничимся более устоявшимися философскими аспектами теории, то можем сказать, что она доказывает, что природа подчиняется математическим законам, по крайней мере, в первом приближении; но этот факт был известен ученым уже много лет назад, после открытий Ньютона в области небесной механики. Что касается единства природы (убеждение, которое было неразрывно связано с самим существованием науки), то теория лишь подтверждает научный подход, раскрывая степень единства, отличающуюся возвышенной простотой и красотой. Когда речь заходит о том, следует ли рассматривать природу в идеалистическом или реалистическом смысле, теория относительности дает мало новой информации; и, как и раньше, те, кто желает принять реалистический подход к объективному миру науки, могут свободно это делать, хотя, как мы уже упоминали, есть ряд причин, которые делают эту философию весьма неудовлетворительной. В любом случае, единственное различие между теорией относительности и классической наукой в их отношении к реализму и идеализму заключается в том, что объективный мир науки теперь представляет собой пространство-время, а не отдельное пространство и время.

Теория, несомненно, противоречит мнению, что мы можем с пользой для себя спекулировать на вещах, которые находятся вне контроля эксперимента и наблюдения; таким образом, в этом отношении теория явно антиметафизична. Но это опять же не дает ученым никакой дополнительной информации, поскольку антиметафизическая позиция уже была позицией науки до открытий Эйнштейна и была выражена в утверждении Планка: «Существует то, что можно измерить».

По аналогичным причинам теория с еще большей силой доносит до нас истину, уже признанную наукой, а именно, что пространство, время и одновременность — это понятия, которые можно изучать только эмпирическими методами, с помощью мерных стержней, часов и физических процессов, а также, в более общем плане, путем исследования простейших координаций физических законов. В частности, проблемы определения того, имеет ли одновременность внешних событий какой-либо смысл, и, если да, то является ли она относительным или абсолютным понятием, или, опять же, является ли вселенная конечной или бесконечной, — это вопросы, которые может обсуждать только теоретический физик, и то только после того, как он будет проинформирован о результатах сверхточных наблюдений. *Априорные* спекуляции бесполезны.

Релятивизм также привел к слиянию двух областей знания, которые до сих пор развивались независимо друг от друга: геометрии и физики. Это слияние иллюстрируется фундаментальной ролью, которую играют геометрические величины g_{ik} в законах механики, гравитации и многих других физических явлениях. Как говорит Вейль, этот синтез можно

Pythagoras Newton

обозначить схемой

Einstein

Хотя в настоящее время нельзя сказать ничего больше, можно понять, что даже это фрагментарное пополнение наших знаний о природе имеет значение, которое трудно переоценить.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ГРАФИКИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Теория относительности обращается к так называемому пространственно-временному графическому представлению Минковского, но, за исключением некоторых особенностей, которые вытекают из теории относительности, общий метод графического представления в пространстве и времени был известен классической науке. Действительно, график, прослеживаемый стрелкой термометра, является иллюстрацией этого метода. В нем мы имеем графическое описание изменений высоты ртути с течением времени.

Суть этих графиков пространства и времени заключается в выборе системы отсчета, а затем в представлении последовательных положений тела, движущегося в этой системе, в терминах его последовательных координат пространства и времени. В качестве простого примера рассмотрим железнодорожную насыпь, которая будет служить нашей системой отсчета. Мы ограничимся рассмотрением графического пространственного и временного представления событий, происходящих на поверхности насыпи, а не над ней или под ней. Другими словами, пространство, с которым мы будем иметь дело, для всех практических целей будет сведено к одной линии, а значит, к одному измерению. Затем мы выбираем фиксированную точку (любую) на насыпи и называем ее нашей *точкой отсчета* $\bigcirc$. Благодаря выбору этой точки отсчета, *пространственное положение* любого события, происходящего на насыпи, может быть указано числом. Таким образом, положение события, происходящего на расстоянии двух единиц вправо или влево от точки отсчета, будет обозначено числом +2 или -2, а событие, происходящее в самой точке отсчета, будет иметь число ноль.

Чтобы изобразить эти результаты на листе бумаги, мы нарисуем прямую линию, скажем, горизонтальную, называемую *пространственной осью*; она будет представлять набережную. На этой пространственной оси мы отмечаем точку $\bigcirc$, которая будет представлять нашу начальную точку на набережной. Затем, чтобы изобразить на бумаге положения событий, происходящих, скажем, в одной миле, двух милях, трех милях и т. д. справа от начальной точки на набережной, мы отмечаем точки вдоль нашей пространственной оси на расстоянии одной, двух и трех единиц от точки $\bigcirc$. Очевидно, что мы не можем манипулировать листом бумаги длиной в милю; поэтому мы соглашаемся изобразить расстояние в одну милю вдоль набережной длиной в один фут, один дюйм или один сантиметр вдоль пространственной оси. Неважно, какую единицу измерения мы выберем, главное, чтобы она была указана и последовательно использовалась на протяжении всего графика. Как читатель может понять, эта процедура точно такая же, как и при составлении плана города.

До сих пор наш график сводился к пространственному графику точек, расположенных вдоль набережной. Но теперь мы должны ввести время. Два события могут произойти в одной и той же точке набережной, но в совершенно разное время, и наш график в его нынешнем виде не дает нам возможности графически различить эти два события. Соответственно, мы согласимся отображать такие различия во времени на нашем листе бумаги, размещая точки, представляющие события, на разной высоте над или под пространственной осью. Если мы предположим, что все точки на нашей пространственной оси представляют пространственное и временное положение событий, происходящих на

набережной в момент времени ноль или в полдень, то из этого следует, что все точки над или под пространственной осью будут представлять события, происходящие на набережной либо после, либо до момента времени ноль. Это эквивалентно рассмотрению вертикальной оси, называемой *осью времени*, по которой будут измеряться продолжительности, а значит, и моменты времени. Конечно, как и в случае с расстояниями, мы должны согласовать некоторую единицу длины в нашем графике, чтобы отобразить одну секунду времени. Мы можем выбрать эту единицу по своему усмотрению (); мы можем, например, отобразить одну секунду одним футом или одним дюймом по вертикали (Ot). Однако по причинам, которые станут очевидными в теории относительности, выгодно, хотя и не обязательно, выбрать одну и ту же единицу длины в нашем графике, чтобы отобразить как одну секунду времени, так и 186 000 миль расстояния.

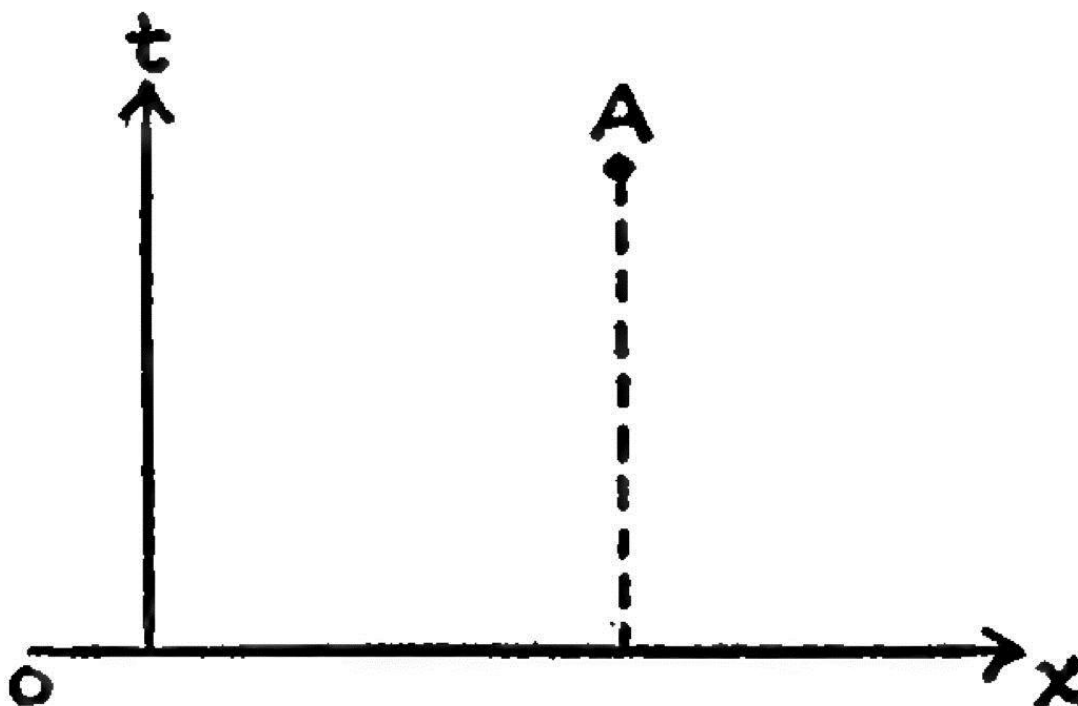


Рис. IX

Предположим, например, что мы согласны отобразить эти величины длиной в один дюйм на нашем графике; тогда точка, такая как A , расположенная в одном дюйме от Ox и в одном дюйме от Ot , будет представлять пространственное и временное положение события, происходящего на набережной в 186 000 миль справа от начала координат O и через одну секунду после нулевого момента времени ([рис. IX](#)).

Таким образом, мы видим, что на нашем графике пространства и времени точка, нанесенная на лист бумаги, представляет собой не только положение в пространстве вдоль набережной, но и момент времени. По этой причине такие точки графика называются *точечными событиями*. Таким образом, точечное событие представляет собой графическое отображение мгновенного события, происходящего в любом месте и в любое время вдоль набережной. Положение точечного события относительно наших осей пространства и времени будет тогда однозначно определять пространственно-временное положение

физического события относительно набережной и времени нуль, при условии, что единицы измерения на графике были указаны.

А теперь рассмотрим представление событий, которые длятся и не являются мгновенными. Здесь отметим, что существование тела, скажем, камня на набережной, представляет собой событие, поскольку положение камня можно определить в пространстве и во времени. Но камень существует: его существование не является мгновенным; следовательно, его постоянство определяется непрерывной последовательностью точечных событий, образующих непрерывную линию. Эта линия, задающая последовательные положения камня как в пространстве, так и во времени, называется мировой линией. Для того чтобы камень обладал мировой линией, не обязательно, чтобы он двигался по набережной; он может оставаться в покое. Единственное различие будет заключаться в том, что если камень находится в покое, его мировая линия будет вертикальной, а если он движется по набережной, его мировая линия будет наклонной, поскольку в этом случае пространственное положение камня будет меняться с течением времени. Если скорость камня вдоль набережной постоянна, его мировая линия будет прямой, тогда как если движение неравномерно или ускоряется, мировая линия будет более или менее изогнутой. Предполагая, что движение равномерно, чем больше скорость тела, тем больше его мировая линия будет отклоняться от вертикали и стремиться стать горизонтальной.

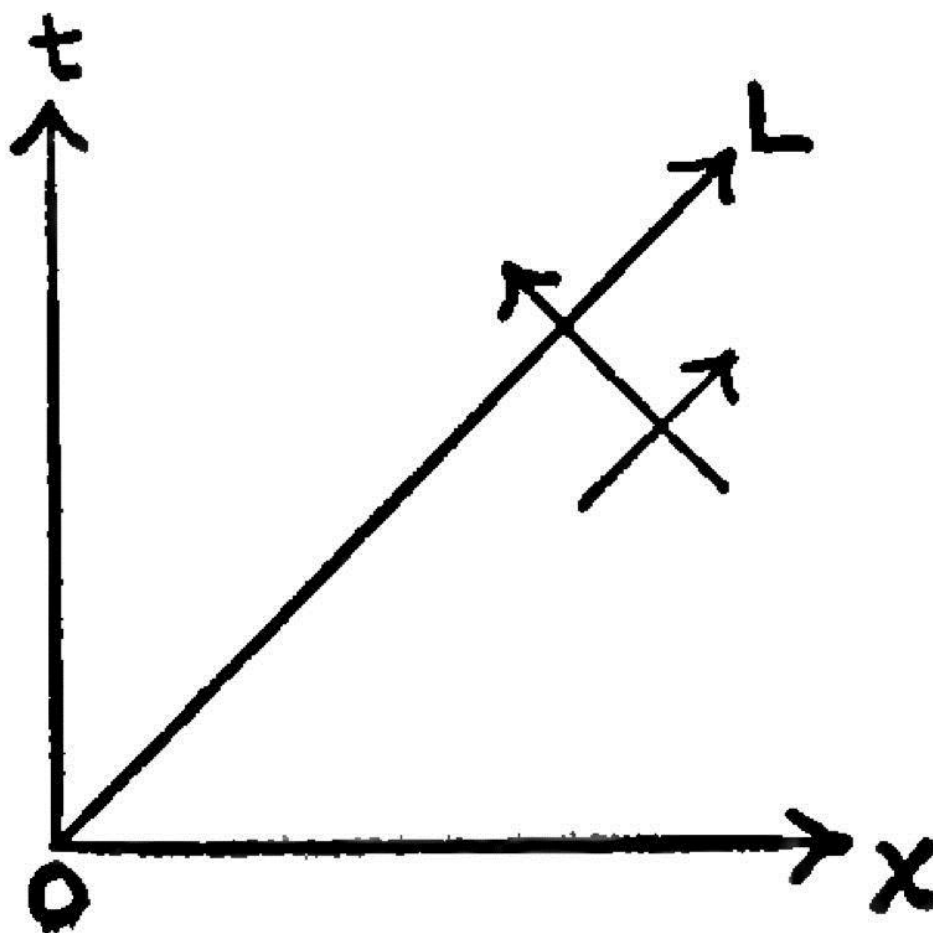


Рис. X

Конечно, как легко понять, наклон мировых линий на графике (за исключением исключительных случаев, таких как тело в покое) будет зависеть от выбранных нами единиц измерения. С выбранными нами единицами измерения мировые линии тел, движущихся по набережной со скоростью 186 000 миль в секунду, будут иметь наклон 45° по отношению к осям пространства и времени. Другими словами, мировые линии таких тел, а значит, и лучей света, будут наклонены одинаково по отношению к нашим осям пространства и времени. Таким образом, любая прямая линия, наклоненная таким образом вправо или влево ([рис. X](#)), будет представлять мировую линию тела, движущегося относительно набережной со скоростью света вправо или влево. Причина, по которой мы выбрали наши единицы пространства и времени именно таким образом, заключалась именно в том, чтобы придать эту симметричную позицию мировым линиям света, учитывая важную роль, которую скорость света играет в теории относительности. Мы можем рассмотреть еще один случай, когда тело движется с бесконечной скоростью вдоль набережной (предполагая, конечно, что существование такого движения физически возможно). Тело, очевидно, будет находиться везде вдоль набережной в один и тот же момент времени; следовательно, его мировая линия будет горизонтальной. Таким образом, ось пространства сама по себе является мировой линией тела, движущегося вдоль набережной с бесконечной скоростью в момент времени $z=0$. И наоборот, ось времени является мировой линией тела, остающегося неподвижным в начале координат. Опять же, мы можем сказать, что ось пространства представляет собой совокупность событий, происходящих на набережной в момент времени ноль, а значит, одновременных друг с другом и с моментом времени ноль. Аналогично, любая горизонталь представляет собой совокупность событий, происходящих на набережной в какой-то данный момент времени, причем высота этой горизонтали над или под осью пространства определяет время.

До сих пор мы рассматривали события по отношению к наблюдателю, находящемуся в покое на набережной, и все, что мы сказали, одинаково применимо как к классической науке, так и к теории относительности. Только при рассмотрении наблюдателей, находящихся в относительном движении, возникнут различия в нашем графическом представлении.

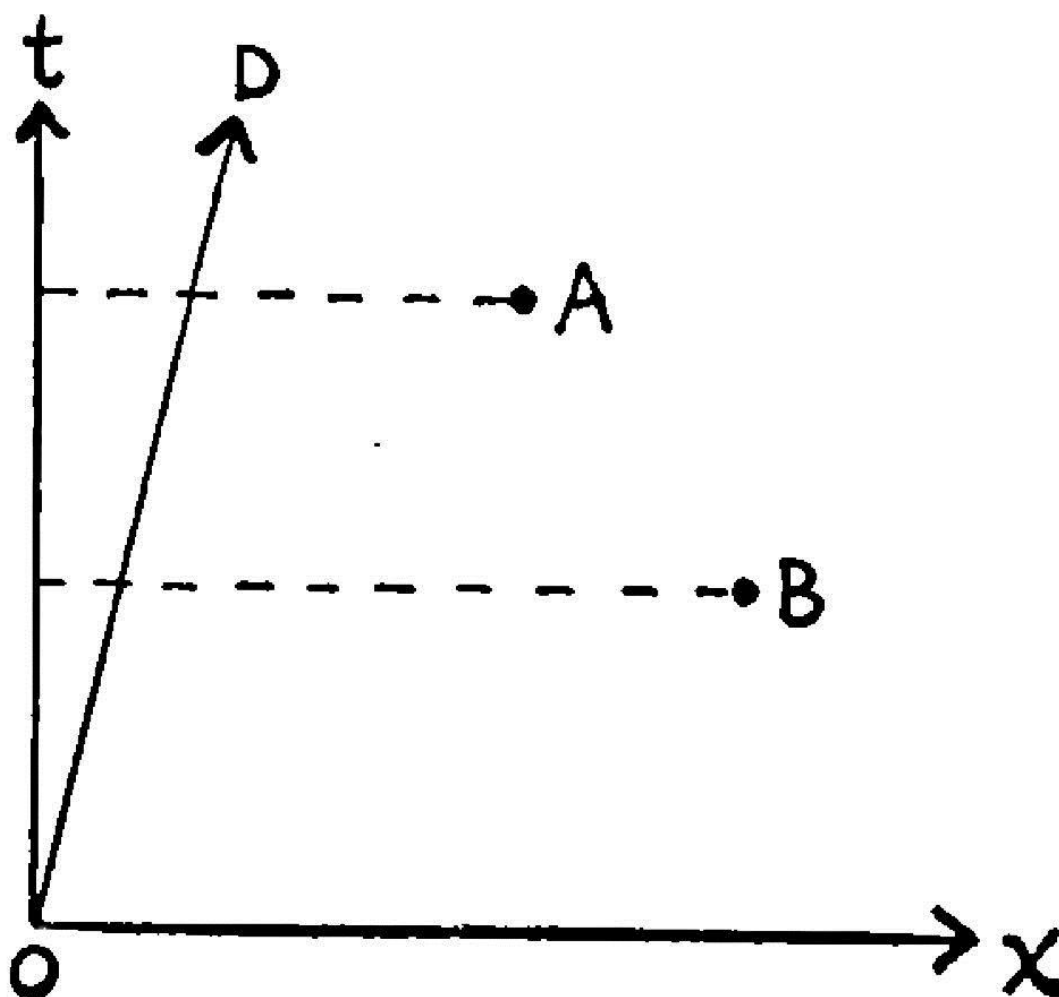


Рис. XI

Рассмотрим сначала случай классической науки. И здесь важно понимать, что наш график — это не что иное, как описание: он просто *графически описывает* отношения продолжительности, расстояния и движения, которые мы хотим представить. Следовательно, нам предстоит с помощью экспериментов выяснить, какими будут эти отношения. Только после выполнения этой предварительной работы мы сможем графически представить эти отношения. Теперь классическая наука, как в результате грубого опыта, так и позже, в результате более точных измерений, придерживалась мнения, что продолжительность и расстояние являются абсолютными величинами, поскольку их величины никогда не будут изменяться в зависимости от наших условий движения. Соответственно, независимо от того, находились ли мы в покое на набережной или в движении, предполагалось, что продолжительность, разделяющая два события, или расстояние между двумя фиксированными точками на набережной остаются неизменными. В графическом представлении это означало, что оси пространства и времени никогда не должны были изменяться в нашем графике, независимо от движения наблюдателя на набережной, чьи измерения мы пытались отобразить.

Рассмотрим два точечных события, такие как *A* и *B* ([рис. XI](#)). По отношению к набережной эти два точечных события представляют собой два мгновенных события, происходящих на набережной на определенном расстоянии друг от друга в пространстве и во времени. Предположим, что наблюдатель покидает начало координат в момент времени нуль и

движется вдоль набережной вправо. Его линия мира будет задана линией вида OD . Поскольку независимо от его движения, эти два события A и B должны проявлять точно такое же временное разделение, как и раньше, мы должны предположить, что движущийся наблюдатель должен придерживаться измерений, вычисленных вдоль той же оси времени Ot .

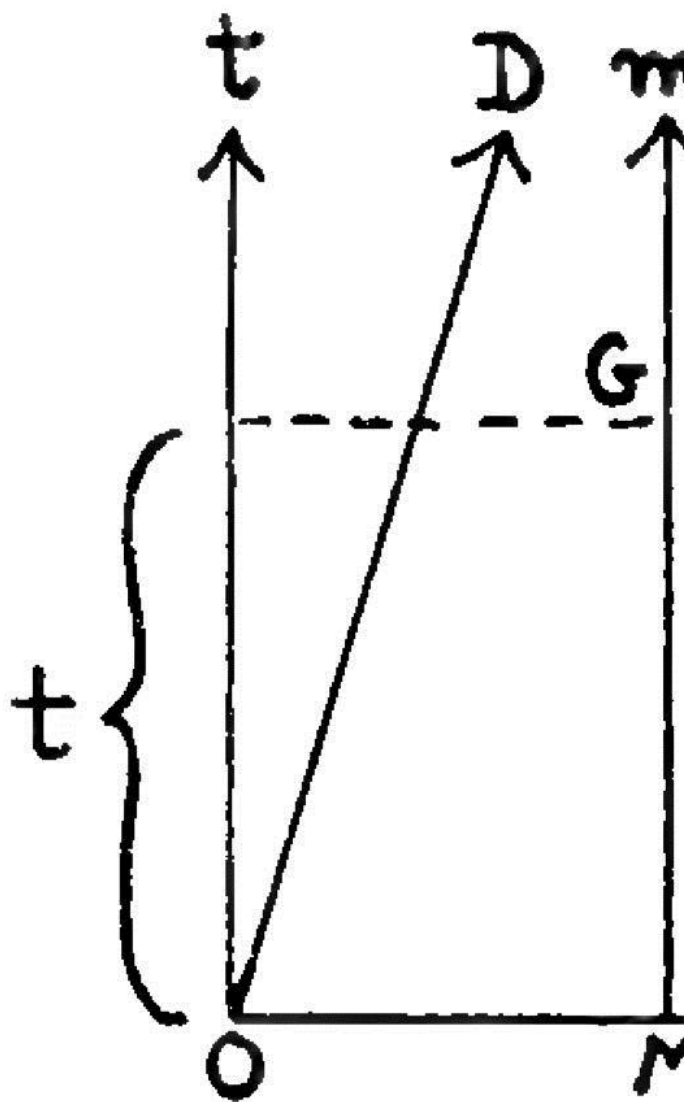


Рис. XII

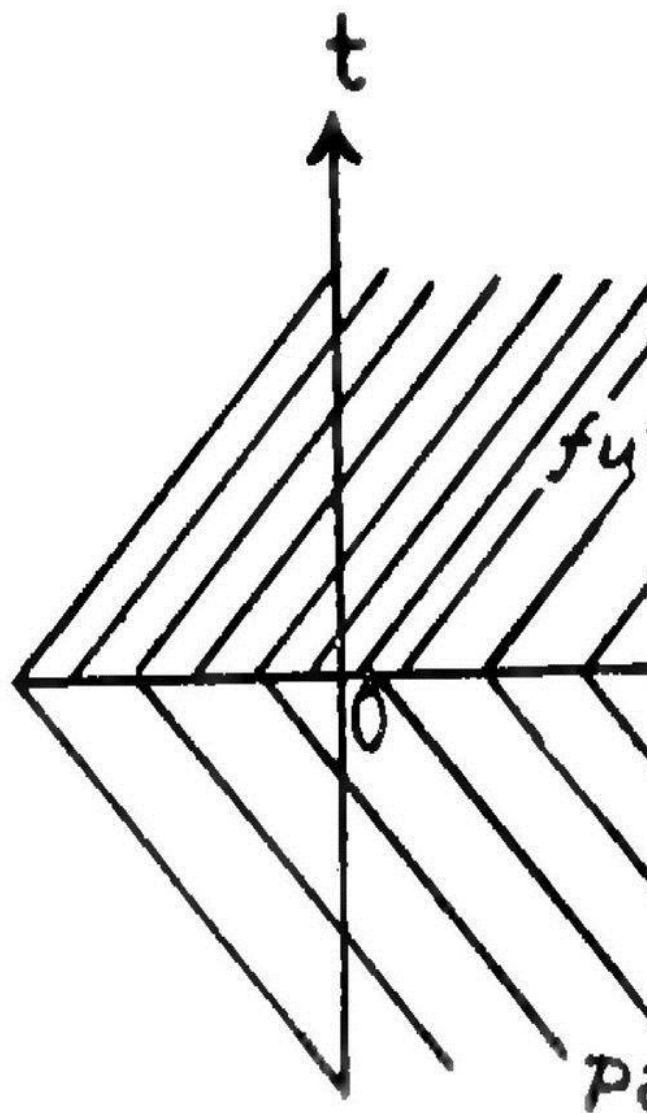


Рис. XIII

Далее рассмотрим два камня M и N , лежащие на набережной. Их мировые линии будут Mm и Nn соответственно (рис. XII), а расстояние между ними в любой момент времени будет задано длиной GH горизонтали, расположенной на высоте t над Ox (поскольку мировые линии вертикальны, это расстояние, конечно, не может изменяться со временем). Теперь, поскольку расстояние между двумя камнями должно оставаться неизменным для движущегося наблюдателя, он также должен измерять это расстояние по горизонтали, а значит, по оси пространства Ox . Другими словами, ось пространства и ось времени являются единственными, или абсолютными.

Из этого, конечно, следует, что, поскольку оси пространства и времени остаются неизменными независимо от нашего движения вдоль набережной, все горизонтали будут представлять события, происходящие одновременно не только для наблюдателя, находящегося в покое на набережной, но и для всех наблюдателей. Таким образом, мы получаем абсолютную природу одновременности.

С другой стороны, поскольку все наблюдатели измеряют время в одном и том же направлении, все они будут признавать одно и то же абсолютное различие между прошлым и будущим, независимо от их положения и движения вдоль набережной. Таким образом, точечные события ниже линии Ox (рис. XIII) будут представлять события, произошедшие на набережной до нулевого часа; точечные события, лежащие выше линии Ox , будут представлять события, произошедшие после нулевого часа, а точечные события, лежащие на линии Ox , будут представлять события, произошедшие в нулевой час.

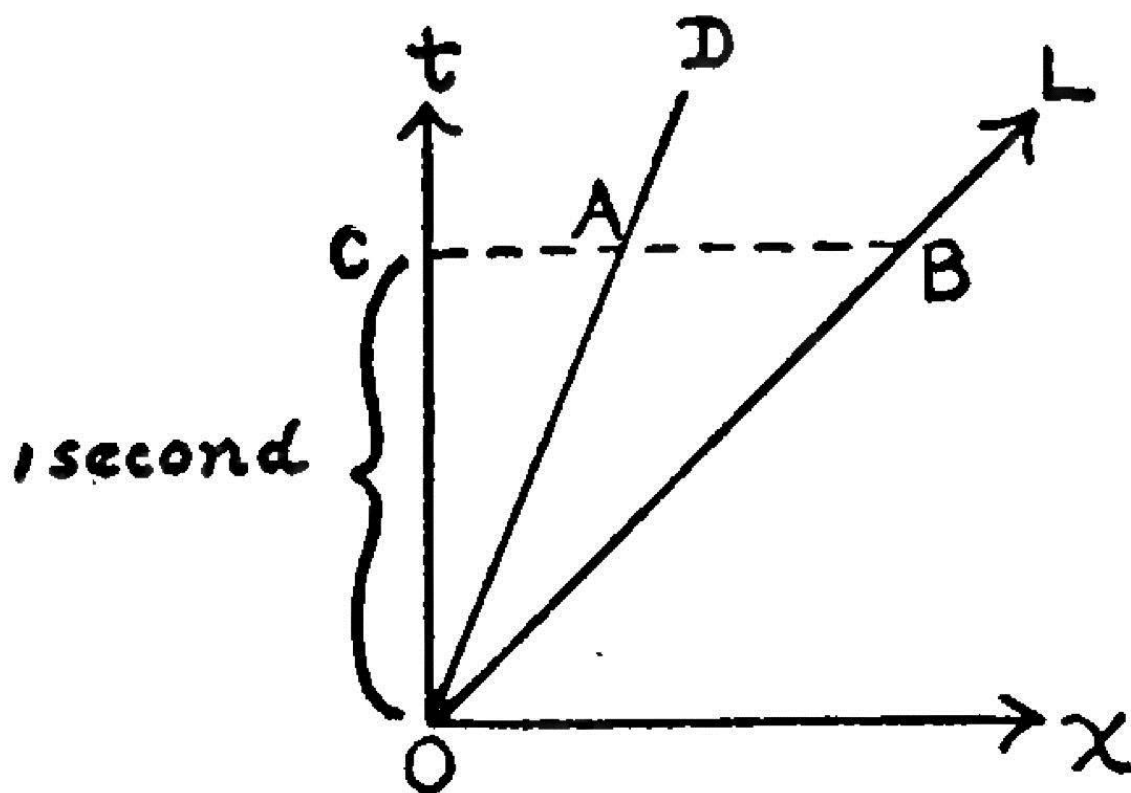


Рис. XIV

В качестве заключительной иллюстрации (рис. XIV) рассмотрим случай наблюдателя, мчащегося за световой волной, причем и наблюдатель, и световое возмущение покинули начало координат O в момент времени ноль. Мировая линия светового луча будет представлена OL , а мировая линия наблюдателя — OD , менее наклонная, чем OL , по крайней мере, если мы рассматриваем случай наблюдателя, движущегося по набережной со скоростью, меньшей скорости света. В определенный момент времени, скажем, через одну секунду после нулевого часа, точечное событие, определяющее положение наблюдателя, будет A , то есть точка на его мировой линии на высоте одного дюйма над Ox . Точечное событие световой волны в тот же момент времени будет B , также на высоте одного дюйма над Ox , а точечное событие наблюдателя, который остался в O , будет C , причем линия CAB , конечно, будет горизонтальной. Следовательно, расстояние световой волны от

движущегося наблюдателя в этот конкретный момент будет AB , что меньше, чем CB , ее расстояние от неподвижного наблюдателя. Отсюда следует, что световой луч движется с уменьшенной скоростью по отношению к движущемуся наблюдателю. Мы могли бы предвидеть это, поскольку мировая линия света OL больше не является одинаково наклоненной к мировой линии OD движущегося наблюдателя (а значит, к последовательным положениям его тела) и к его пространственной линии Ox .

Мы упомянули основные характеристики пространства и времени: график классической науки, и мы должны обнаружить, что он сводится к простому геометрическому представлению классических галилеевых преобразований пространства и времени

$$x' = x - vt; \quad t' = t.$$

классической науки, а именно

Таким образом, все проблемы, которые мы обсуждали, могут быть решены либо геометрически, либо аналитически.

Общеизвестно, что этот график пространства и времени, который мы обсуждали, редко упоминался в классической науке; а такие названия, как «точечные события» и «мировые линии», были неизвестны до открытий Минковского. Поэтому может показаться странным, что теория относительности так широко использовала графический метод представления. Причина заключается в том, что в классической науке график сводился к простому геометрическому наложению пространства и времени, что было удобно в некоторых случаях, но не имело глубокого значения. Из-за раздельности пространства и времени, иллюстрируемой абсолютностью осей пространства и времени, не существовало никакого слияния, никакого единства между пространством и временем. Они не образовывали единого четырехмерного континуума событий *в каком-либо глубоком смысле*. Попытаемся понять смысл этих утверждений.

В классической науке пространство рассматривалось как трехмерное континуум точек, потому что было возможно локализовать положение точки в нашей системе отсчета, ссылаясь на ее три координаты. Предположим, что мы хотим измерить расстояние между двумя точками в пространстве. Все, что нам нужно сделать, это протянуть ленту между двумя точками, и длина ленты определит расстояние между ними.

А теперь давайте рассмотрим пространство и время в классической науке. Здесь мы снова могли бы утверждать, что пространство и время составляют четырехмерное континуум событий, поскольку мы всегда могли бы определить местоположение мгновенного события, измерив три пространственные координаты в нашей системе отсчета и вычислив момент, в который произошло событие. Но предположим, что мы хотим измерить расстояние между двумя событиями, произошедшими, скажем, одним в Нью-Йорке в понедельник, а другим в Вашингтоне во вторник. Очевидно, что эта задача не имеет смысла. Мы могли бы сказать, что расстояние в пространстве между двумя событиями составляет столько-то миль, а расстояние во времени — столько-то часов, но мы не смогли бы измерить расстояние в пространстве-времени напрямую, тогда как с помощью ленты в нашем предыдущем примере мы могли сразу измерить пространственное расстояние между двумя точками.

Таким образом, мы видим, что хотя и классическое пространство, и классическое *пространство-время* составляли соответственно трехмерное и четырехмерное континуум,

между этими двумя континуумами существовала огромная разница . Первое было метрическим континуумом, тогда как классическое *пространство-время* не имело четырехмерной метрики.

Мы можем представить эти аргументы немного по-другому, а именно: мы говорим, что необходимым условием для того, чтобы континуум точек образовал метрический континуум, обладающий определенной геометрией, является наличие определенного однозначного выражения, инвариантного по величине, для расстояния между любыми двумя точками. Теперь это условие, безусловно, не реализуется в нашем классическом графике пространства и времени.

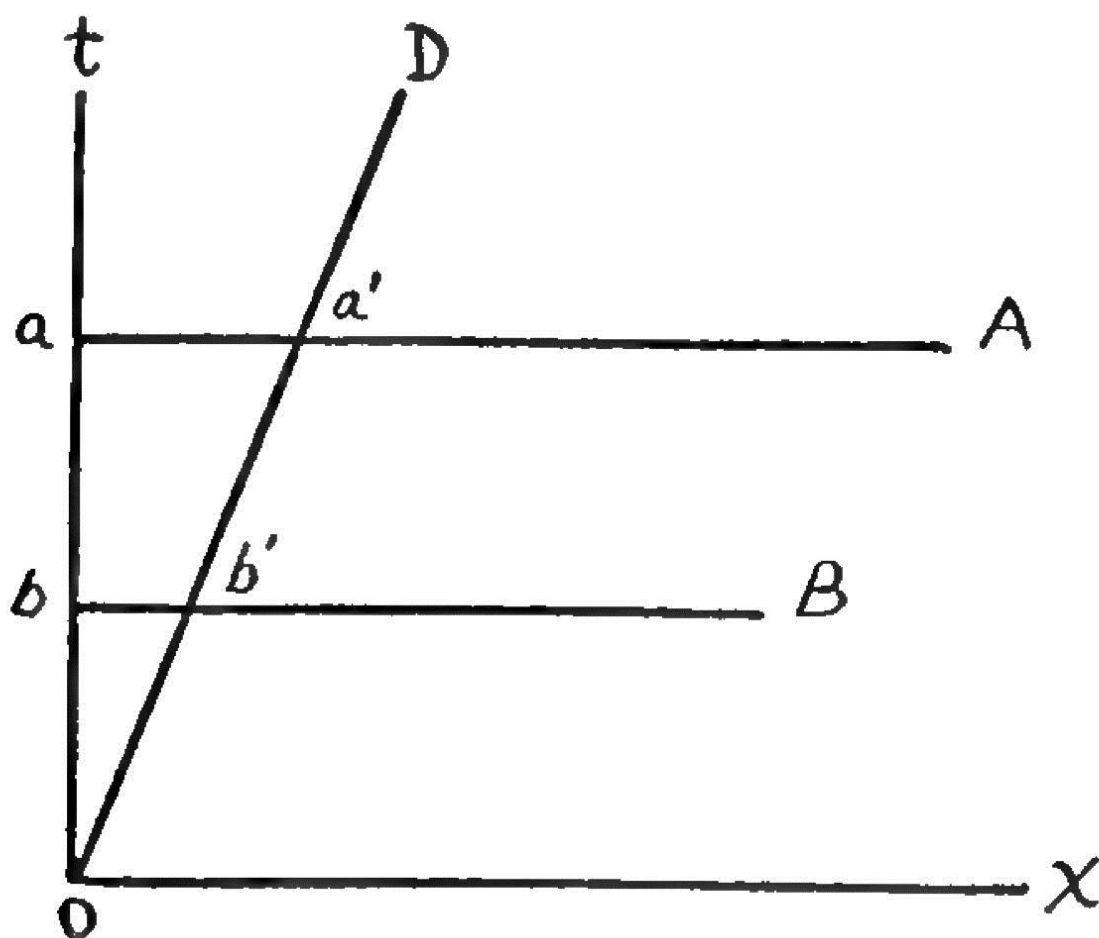


Рис. XV

Рассмотрим, как и ранее, набережную, наблюдателя, находящегося в покое в точке O (чья мировая линия тогда будет Ot), наблюдателя, находящегося в движении (чья мировая линия будет OD), и, наконец, два точечных события A и B ([рис. XV](#)). Мы хотим найти для расстояния между точечными событиями A и B некоторое математическое выражение, которое будет одинаковым для всех наблюдателей, независимо от их движения. Теперь очевидно, что в то время как временное расстояние между A и B , заданное разностью высот этих двух точечных событий над Ox , остается одинаковым для всех наблюдателей, это уже не верно для их пространственного расстояния. Так, для наблюдателя, находящегося в покое, пространственное расстояние между A и B составляет $Aa - Bb$, тогда как для движущегося наблюдателя оно составляет $Aa' - Bb'$, т. е. имеет другую величину. Таким образом, из-за фиксированности временного расстояния и изменчивости

пространственного расстояния становится невозможным построить инвариантное математическое соотношение, способное выразить расстояние. Именно это имеется в виду, когда мы говорим, что пространство и время классической науки не могут рассматриваться как четырехмерное метрическое континуум событий. Пространство и время, рассматриваемые совместно, сводились к сопоставлению континуума точек в пространстве и континуума моментов времени; поскольку только пространство и только время составляли отдельные метрические континуумы.

Минковскому принадлежит честь установления слияния между ними. Теперь и только теперь мы можем говорить о пространственно-временном расстоянии, или интервале Эйнштейна, между двумя событиями — скажем, одним, происходящим в Нью-Йорке в понедельник, а другим — в Вашингтоне во вторник. *Только сейчас, благодаря сверхточным экспериментам и гению Эйнштейна и Минковского, имеет смысл говорить о пространстве-времени как о четырехмерном континууме событий, который мы называем пространством-временем.* До этих достижений концепция пространства-времени была столь же искусственной, как и концепция четырехмерного континуума пространства, времени, давления, температуры, цвета и т. д.

Теперь мы рассмотрим, в какой степени графическое представление классической науки должно быть изменено, чтобы согласовать его с эмпирическими фактами, выявленными в ходе ультраточных экспериментов. Нет необходимости изменять наше понимание точечных событий и мировых линий; они останутся неизменными.

Разделение между двумя графиками возникает, когда мы рассматриваем принцип неизменной скорости света. Мы видели, что если луч света был направлен вдоль набережной вправо, покидая начало координат O в момент времени ноль, его мировая линия задавалась линией OL , делящей угол $to x$ пополам (рис. XIV). С другой стороны, для наблюдателя, движущегося вправо и имеющего мировую линию OD , световая мировая линия OL больше не будет делить пополам угол, образованный его собственной мировой линией OD и пространственной осью Ox . Физическое значение этого факта заключалось в том, что скорость света для движущегося наблюдателя будет меньше, чем для наблюдателя на набережной. Теперь этот результат противоречил принципу неизменной скорости света. Следовательно, если мы хотим создать график, способный дать результаты, соответствующие этому принципу, мы должны предположить, что для всех наблюдателей, движущихся вдоль набережной, линия OL будет делить пополам угол, образованный их соответствующими мировыми линиями и пространственными осями. Из этого следовало, что пространственной осью движущегося наблюдателя больше не могла быть ось Ox , а должна была стать новая линия Ox' , такая, что OL делила бы угол DOx' пополам. Аналогичным образом, время наблюдателя должно было бы измеряться вдоль его собственной мировой линии OD , теперь называемой Ot' (рис. XVI).

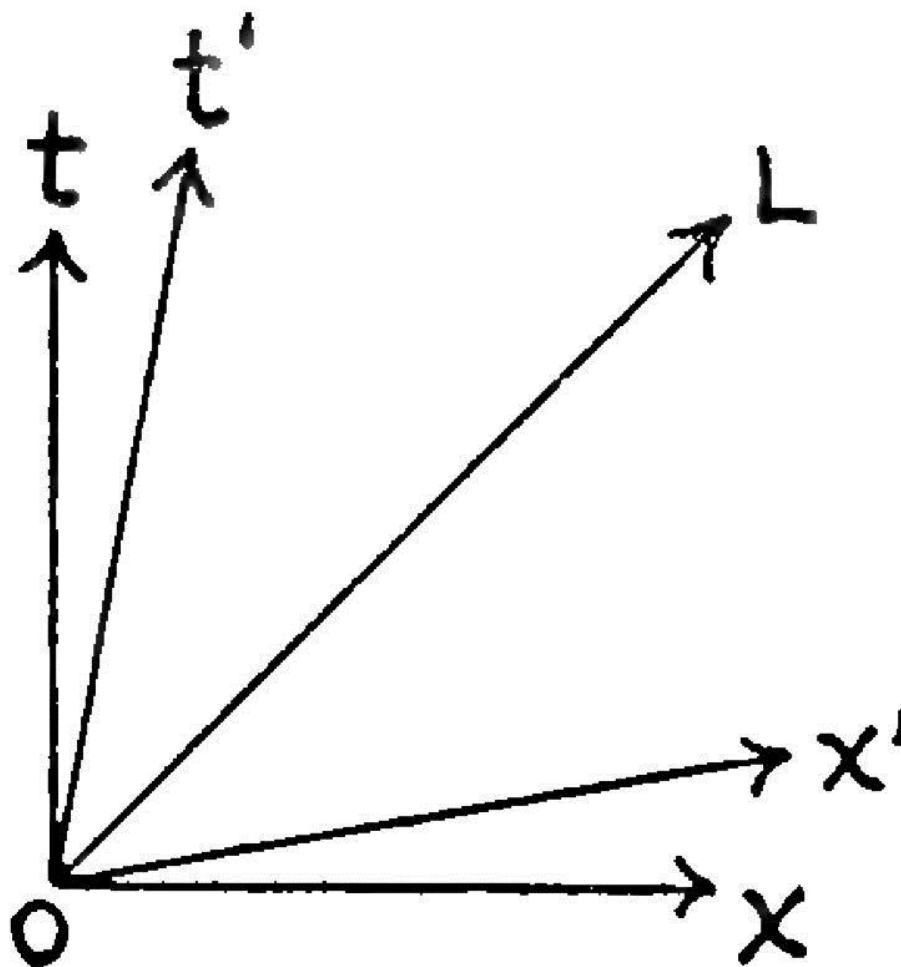


Рис. XVI

Отсюда мы делаем вывод, что направления пространства и времени Ox и Ot больше не являются абсолютными; каждый наблюдатель должен будет измерять время вдоль своей мировой линии, а пространство — вдоль линии, ортогональной этой мировой линии. [\[164\]](#) Отсюда следует, что существует неопределенное число направлений времени, заданных мировыми линиями различных наблюдателей, и соответственно неопределенное число направлений пространства.

Первым следствием этой новизны является то, что одновременность больше не может быть абсолютной. В то время как в классическом графике все события, происходящие в одном и том же горизонтальном или пространственном направлении, были одновременными для всех наблюдателей, теперь мы понимаем, что с этим изменением в пространственных направлениях, или линиях одновременного происхождения, абсолютность одновременности должна исчезнуть. Например, все точечные события, лежащие на Ox' , которые, следовательно, являются одновременными с моментом времени нуль для движущегося наблюдателя, для неподвижного наблюдателя кажутся разворачивающимися последовательно.

Также следует, что, поскольку, согласно теории относительности, ни один наблюдатель не может двигаться быстрее света, все допустимые мировые линии наблюдателей

(проходящие через O в момент времени ноль) будут содержаться между двумя световыми мировыми линиями OL и OL' (рис. XVII).

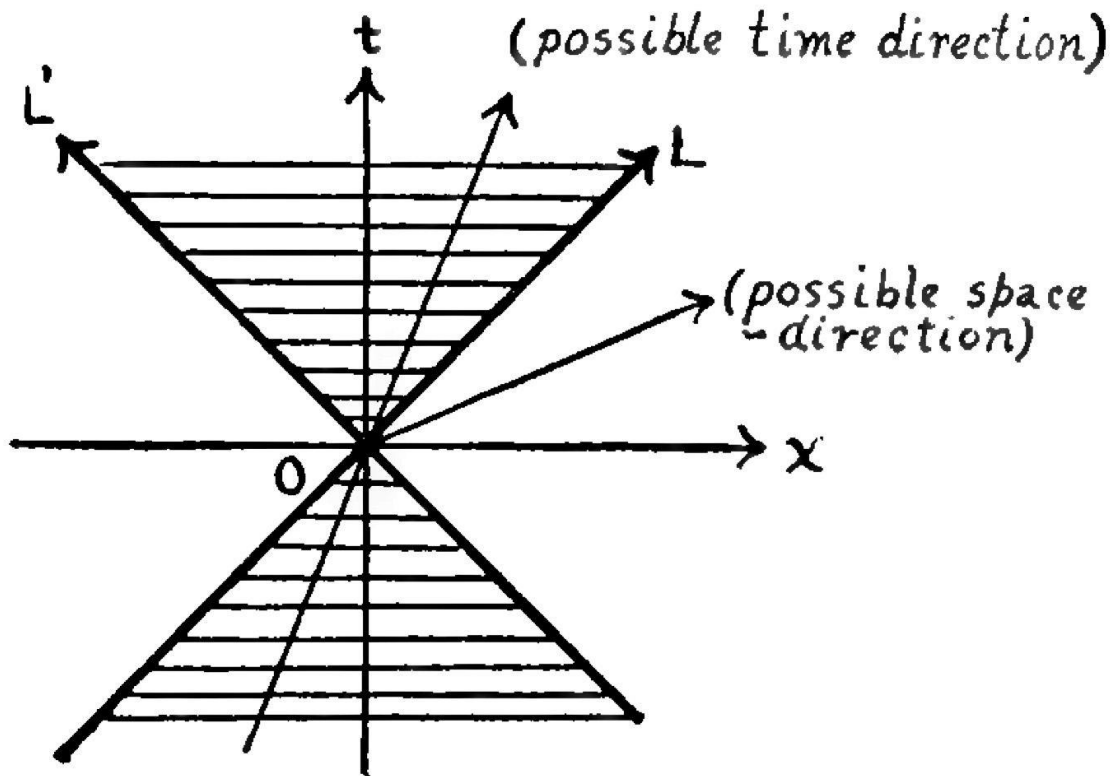


Рис. XVII

Любая линия, проходящая через эти две световые линии O и не содержащаяся между ними, никогда не может быть мировой линией, следовательно, никогда не может быть направлением времени; она будет пространственным направлением какого-либо возможного наблюдателя. Мы можем распространить эти результаты на два пространственных измерения. В этом случае наши мировые линии световых лучей, проходящие через O в момент времени ноль, образуют конус, называемый *световым конусом*, с вершиной в точке O . Прямые линии, проходящие через O и содержащиеся внутри светового конуса, являются возможными мировыми линиями или направлениями времени; те, которые проходят через O , но лежат вне конуса, составляют возможные пространственные направления для соответствующих наблюдателей или, опять же, возможные места одновременных событий. Конечно, каждая точка-событие, взятая за отправную точку, дает начало световому конусу, так что в общем случае мы можем сказать, что все линии, параллельные линиям, содержащимся в любом данном световом конусе и проходящим через его вершину, составляют возможные мировые линии или направления времени. Таким образом, очевидно, что любой световой конус определяет предельные направления в пространстве-времени. Все линии, наклон которых меньше наклона генераторов конуса, являются возможными направлениями времени, а все линии, наклон которых больше, являются возможными направлениями пространства. Таким образом, мы понимаем важность светового конуса в определении особенностей структуры пространства-времени. В случае четырехмерного пространства-времени конус становится трехмерной поверхностью, которую нелегко визуализировать, но это, конечно, не должно беспокоить нас, когда мы рассуждаем аналитически.

И здесь необходимо упомянуть еще один момент. Поскольку никакие возмущения не могут достигать нас со скоростью, превышающей скорость света, мировая линия возмущения никогда не может лежать за пределами светового конуса, на вершине которого мы в данный момент находимся. Другими словами, события, которые мы можем осознать (иначе, чем визуально) в данный момент, всегда будут представлены точечными событиями, расположенными внутри конуса под нами, в направлении прошлого. События, которые мы воспринимаем визуально в данный момент, всегда будут лежать на поверхности конуса.

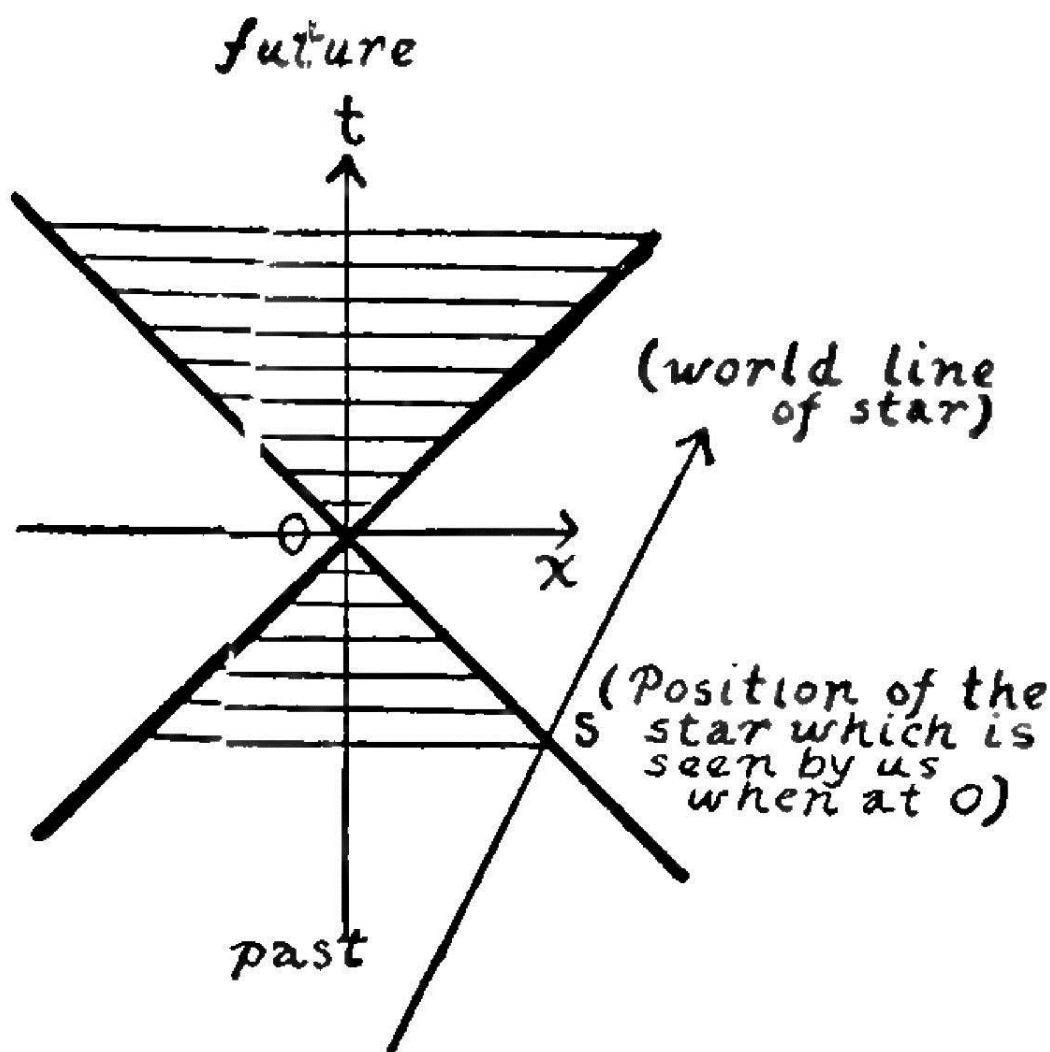


Рис. XVIII

Таким образом, если звезда внезапно становится видимой в небе, точечное событие этой звезды, когда она вдруг стала заметной, расположено на поверхности нашего мгновенного светового конуса где-то в прошлом ([рис. XVIII](#)).

Аналогичным образом, единственные события, на которые мы можем повлиять, должны лежать в верхней части конуса или на ней. Событие, происходящее за пределами конуса, никогда не может повлиять на нас или быть подвержено нашему воздействию в данный момент. Однако оно может повлиять на нас в конечном итоге, когда в результате подъема

нашего светового конуса вместе с нами вдоль нашей мировой линии он наконец коснется поверхности конуса. Тогда событие станет видимым, при условии, что оно светящееся. Оказавшись внутри конуса, событие может быть воспринято другими способами, например, посредством звука и т. д., но уже не в результате передачи света *в вакууме*. Мы также можем утверждать, что когда два точечных события лежат в одном направлении времени, их порядок следования останется одинаковым для всех наблюдателей; следовательно, в этом случае можно представить себе причинно-следственную связь между ними. Но если два события лежат в одном направлении пространства, они могут быть одновременными, последовательными и предшествующими или предшествующими и последующими в зависимости от нашего движения. События, представленные такими точечными событиями, никогда не могут рассматриваться как проявляющие какую-либо причинно-следственную связь друг с другом. Таким образом, мы видим, что поскольку именно световой конус различает пространственное и временное направления, а также события, которые могут быть причинно связаны, от тех, которые не могут быть связаны, необратимость времени и проблема причинности связаны с существованием светового конуса.

В общем случае мы можем сказать, что в то время как классический график показывал абсолютное прошлое, настоящее и будущее для всех наблюдателей, в новом графике это утверждение должно быть изменено следующим образом: если мы рассматриваем всех наблюдателей, находящихся в определенной точке в определенный момент времени, то есть всех наблюдателей, пространственно-временное положение которых задано одной и той же общей точкой-событием, то независимо от их относительных движений для всех действует один и тот же мгновенный световой конус. Вершина конуса задается общим точечным событием, и все точечные события, расположенные внутри или на поверхности конуса, находятся в мгновенном прошлом или будущем для всех наблюдателей. Таким образом, даже в теории относительности существуют абсолютное прошлое и абсолютное будущее. С другой стороны, все точечные события, расположенные вне конуса, не будут ни прошлым, ни будущим в абсолютном смысле, поскольку они могут находиться в прошлом, настоящем или будущем в зависимости от движения наблюдателя.

Мы также можем упомянуть, что благодаря неопределенности направлений пространства и времени наш график теперь имеет дело с подлинным континуумом, *пространственно-временным континуумом*, который не может быть разделен каким-либо уникальным образом на пространство и время.

Мы также должны обнаружить, что пространственно-временное расстояние между любыми двумя точечными событиями, *A* и *B*, для которых не существовало абсолютного выражения в классическом графике, теперь будет принимать абсолютное значение, одинаковое для всех наблюдателей. Это расстояние является *интервалом Эйнштейна*, открытым Минковским, который позволяет нам связать определенную геометрию с четырехмерным континуумом событий. Эта геометрия не является евклидовой, а полувеклидовой. Если принять во внимание открытия Минковского, то становится видно, что пространственно-временное расстояние, измеренное по линии, которая может быть прослежена внутри светового конуса, а значит, на мировой линии, является мнимой величиной; тогда как, если измерить его по линии, лежащей вне любого светового конуса, расстояние становится действительным. Однако не следует придавать большого значения тому, что время является мнимым, а пространство — реальным, поскольку мы могли бы с таким же успехом представить себе пространство как мнимое, а время — как реальное. Важно только отметить, что существует математическое различие между различными направлениями в пространстве-времени: теми, которые лежат внутри конуса и являются

временными, и теми, которые лежат снаружи и являются пространственными. Только первые могут сопровождаться физическими возмущениями и материальными телами.

Может быть полезно рассмотреть эту странную геометрию пространства-времени немного подробнее. Мы ограничимся двумя измерениями, то есть одним пространственным измерением и временным измерением. Другими словами, наш график пространства-времени будет относиться к измерениям наблюдателей, движущихся вдоль набережной.

Предположим, что несколько наблюдателей, движущихся с различными постоянными скоростями вправо или влево, проходят мимо наблюдателя на набережной в точке O в момент времени ноль. Эти наблюдатели несут в руках обычные часы, и все они отмечают час ноль, когда наблюдатели одновременно проходят мимо точки O . Вопрос, который мы хотим решить, следующий:

«Где на графике будут находиться точечные события различных наблюдателей, когда их часы покажут одну секунду после нулевого часа?»

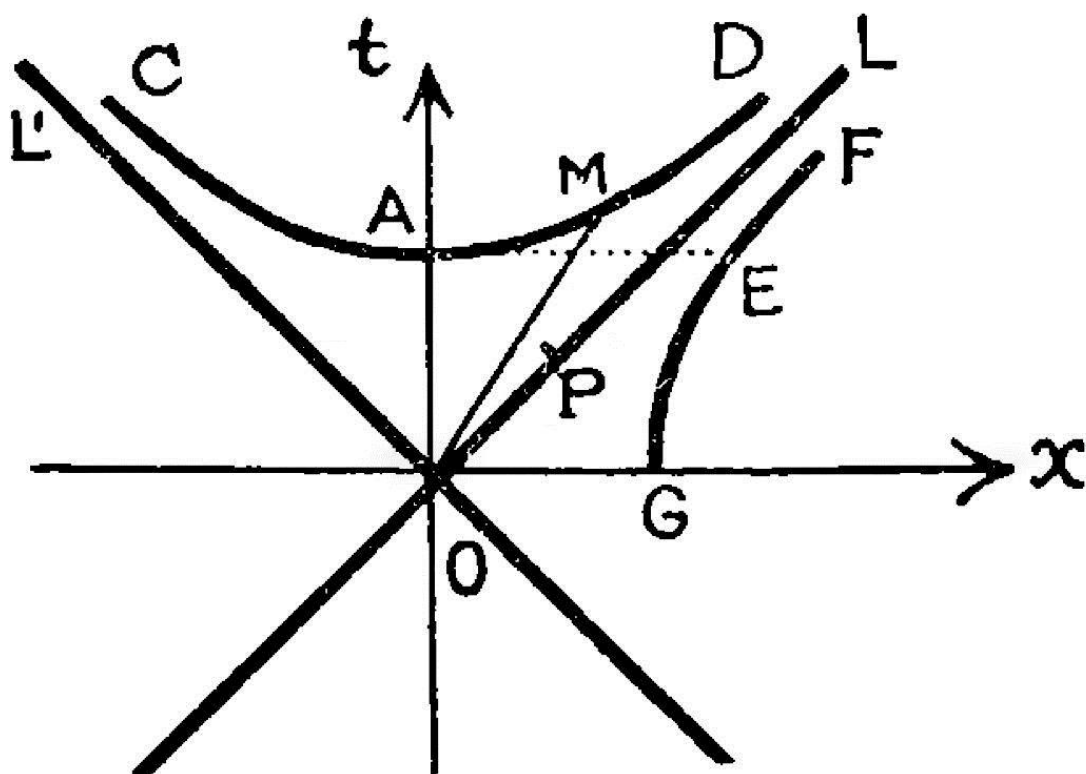


Рис. XIX

Мы знаем, что точечное событие наблюдателя, который не движется из точки O на набережной, будет расположено на вертикали Ot на расстоянии $OA =$ одна секунда или один сантиметр на нашем графике (рис. XIX). Затем расчет показывает, что точечные события всех других наблюдателей будут располагаться на равносторонней гиперболе, проходящей через A и имеющей в качестве асимптот две световые мировые линии OL и OL' . Например, наблюдатель, чья мировая линия OM , окажется в точке M , когда его часы покажут ноль часов плюс одна секунда, то есть когда он пройдет по набережной от O в течение одной секунды, измеренной его часами. В классической науке, конечно, точечные события различных наблюдателей располагались бы на пересечении их мировых линий с горизонталью AE , а не с гиперболой CAD . Дело не в том, что релятивистские часы отличаются от классических; мы всегда рассматриваем наши обычные хронометры. Новизна заключается исключительно в том, что благодаря сверхточным экспериментам () наше понимание поведения часов и стержней стало более точным, чем раньше.

Из всего этого мы можем сделать вывод, что пространственно-временные расстояния от O до любой из точек на гиперболе представляют собой конгруэнтные пространственно-временные расстояния в геометрии пространства-времени. Мы также можем отметить, что если бы пространство-время было евклидовым, а не полувеклидовым, то местоположение точек, определяемых гиперболой, было бы задано окружностью с центром O .

А теперь рассмотрим мировую линию луча света, покидающего точку O в момент времени ноль. Мы видим, что эта мировая линия (OL или OL') не пересекает гиперболу или, если предпочесть, пересекает ее в бесконечности. Отсюда следует, что пространственно-временные расстояния OA , OM и т. д. все равны OL , где L находится на бесконечном расстоянии. Следовательно, мы должны сделать вывод, что, поскольку точка L должна быть бесконечно удалена, чтобы OL имела конечное пространственно-временное

значение, любое такое пространственно-временное расстояние, как OP , где P является любой точкой на OL , должно быть равно нулю. Другими словами, с точки зрения пространственно-временной геометрии, точечные события на одной и той же мировой линии света находятся на нулевом расстоянии друг от друга. Соответственно, мировая линия света, т. е. любая линия, наклоненная под углом 45° , называется *нулевой линией*. Линии такого рода были хорошо известны геометрам задолго до теории Эйнштейна, поэтому не следует полагать, что нулевая линия является одним из странных понятий, которые мы обязаны относительности. Все, что сделал Минковский, — это дал нам физическую интерпретацию нулевой линии. Ее можно проиллюстрировать мировой линией наблюдателя, движущегося со скоростью света. Для этого наблюдателя события его жизни не будут иметь временного разделения; хотя, конечно, другой наблюдатель поймет, что эти различные события разделены во времени.

Далее рассмотрим измерения пространственных длин. Предположим, что различные наблюдатели, проходя мимо O , несут шесты, которые они держат как копия, параллельные набережной. Если эти шесты имеют одинаковую длину, когда они расположены рядом в состоянии покоя, то точечные события их дальнейших концов в момент, когда наблюдатели проходят мимо O , будут лежать на гиперболе GF . В этом случае OG дает длину шеста в состоянии покоя на набережной. Конечно, положения концов стержней в момент, когда наблюдатели проходят O , должны быть вычислены в соответствии с определениями одновременности соответствующих наблюдателей. Если стержни имеют длину 186 000 миль, $OG = OA$ = один сантиметр, и две гиперболы будут геометрически одинаковыми. Мы также можем сделать вывод, что пространственно-временные расстояния от O до любой из точек на второй гиперболе равны друг другу. Фактически, мы можем повторить для второй гиперболы, или пространственной гиперболы, те же аргументы, которые мы приводили при обсуждении временной гиперболы.

Теперь мы можем понять, как возникает сокращение Фитцджеральда. Рассмотрим, например, стержень OG , лежащий на набережной. Мировые линии его двух концов будут Ot и Gg соответственно ([рис. XX](#)). Если теперь наблюдатель проходит мимо O в момент времени ноль и движется вправо со скоростью V , его мировая линия будет OP ; но тогда его пространственное направление будет Ox' . Для него поэтому длина стержня, лежащего на набережной, больше не равна OG , как для наблюдателя на набережной, а равна OH . График показывает нам, что эта длина OH короче длины OK стержня, который наблюдатель несет с собой. А поскольку эти два стержня, когда они лежат рядом в состоянии покоя, равны, мы видим, что, по измерениям наблюдателя, стержень на набережной, мимо которой он движется, подвергся сжатию.



Рис. XX

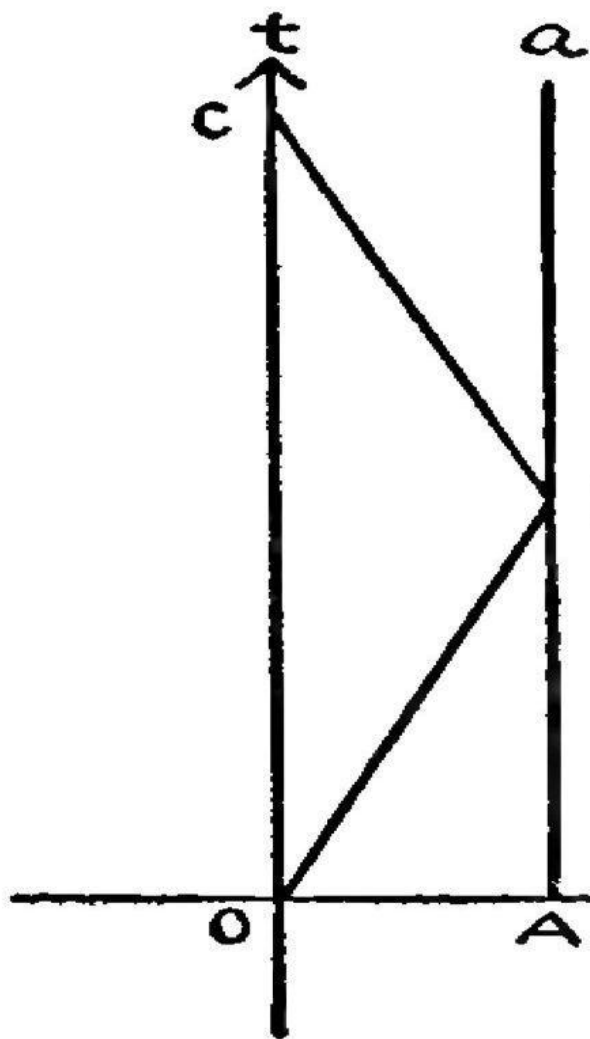


Рис. XXI

В качестве последнего примера рассмотрим путешествие к звезде ([рис. XXI](#)). Если Aa обозначает мировую линию звезды, а OBC — мировую линию путешествующего близнеца, то мы видим, что он прожил время $OB + BC$ во время своего путешествия. Его брат, оставшийся на Земле, будет иметь мировую линию OC . Следовательно, он прожил время OC . Как и раньше, хотя $OB + BC$ кажется длиннее, чем OC , на самом деле оно короче, как можно понять, обратившись к [рис. XIX](#). Между прочим, мы видим, как абсолютная природа ускорения заставляет мировую линию путешественника изгибаться; и именно этот абсолютный изгиб мировой линии различает истории жизни двух близнецов и ответственен за *абсолютное, нереципрокное* различие в их старении.

Отметим также, что, как и в случае с классическим графиком, который геометрически представлял классические галилеевы преобразования, теперь график Минковского просто переводит преобразования Лоренца-Эйнштейна.

И здесь необходимо отметить один важный момент. Мы помним, что перед тем, как приступить к построению графика, нам пришлось определиться с системой координат для измерения пространства и времени. Тогда мы выбрали на листе бумаги одну и ту же длину для представления продолжительности одной секунды и расстояния в 186 000 миль. В результате этого выбора мировые линии лучей света стали диагоналями. Но предположим, что мы выбрали бы другие единицы измерения. Тогда, очевидно, наклон мировых линий, а

значит, и угол светового конуса, изменился бы, и весь вид графика изменился бы. Поскольку наш выбор единиц измерения является полностью произвольным, мы могли бы прийти к выводу, что график не может отражать реальность. Но это мнение было бы необоснованным. Хотя верно, что из-за произвольности наших единиц измерения график не может претендовать на отображение абсолютной формы, он все же выражает определенные отношения, которые изменение единиц измерения не может нарушить. Фактически, мы могли бы представить, что график искажен растяжением, но отношения все равно остались бы неизменными; а отношения — это все, к чему может стремиться наука (или, можно даже сказать, человеческий разум).

С другой стороны, этот вопрос о единицах измерения позволяет нам дать графическое решение вопроса, представляющего большой философский интерес. Мы живем в мире, который, по крайней мере теоретически, сильно отличается от мира отдельного пространства и времени, и все же только благодаря ультраточным экспериментам и гению Эйнштейна и Минковского мы наконец осознали, что это четырехмерное континуум событий. Как же так получилось, что обычное восприятие настолько слепо к фактам?

Чтобы понять этот момент, мы должны упомянуть, что, хотя наш выбор единиц измерения для координации пространства и времени является произвольным, поскольку нет рациональной связи между величиной расстояния в пространстве и продолжительностью во времени, тем не менее, наша повседневная деятельность предполагает общий стандарт сравнения. Дело в том, что расстояния, которые мы сами и другие материальные тела преодолеваем за одну секунду по поверхности Земли, всегда находятся в определенных узких пределах. Это заставляет нас соотносить одну секунду с одним ярдом, а не с 186 000 милями.

Если теперь с помощью этих более привычных единиц мы построим график Минковского, то обнаружим, что он практически идентичен классическому. Мировые линии лучей света, по-видимому, совпадают с пространственной осью Ox , и для обнаружения их отклонений от этой линии потребовался бы график длиной в тысячи миль. Световой конус охватил бы весь график; следовательно, допустимые пространственные направления, лежащие за пределами конуса, по-видимому, были бы ограничены осью Ox . По сути, было бы только одно допустимое пространственное направление, предполагающее абсолютную одновременность и время. Таким образом, мы видим, что именно наши непосредственные потребности, а не космические условия, или, опять же, преобладание вокруг нас низких скоростей, по сравнению с которыми скорость света кажется бесконечной, ввели нас в заблуждение, заставив поверить в мир, где пространство и время разделены.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ИЗОГНУТОСТИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Может быть интересно более подробно объяснить значение гравитационных уравнений Эйнштейна. Мы ограничимся уравнениями общей теории в случае бесконечной вселенной.

$$G_k^i - \frac{1}{2}g_k^i G = -T_k^i.$$

Эти уравнения можно записать следующим образом:

Здесь следует отметить, что i и k — это буквы, которые должны быть заменены парами четырех чисел, представляющих четыре измерения пространства-времени. Таким образом, существует ряд гравитационных уравнений — шестнадцать всего. Если отбросить те, которые являются простым повторением других и, следовательно, не дают нам новой информации, то их число сокращается до десяти.

Теперь у нас уже есть общее представление о значении этих уравнений. Левая часть дает нам кривизну пространства-времени от точки к точке, измеренную в нашей системе координат, а правая часть дает нам различные аспекты материи, энергии и импульса, расположенные в тех же точках, где рассчитывается кривизна. Если мы согласимся выбрать наиболее близкий подход к галилеевой системе координат и для простоты согласимся рассматривать ее как галилееву систему, то мы сможем записать компоненты тензора энергии материи в этой системе координат и в результате получим:

$$\begin{aligned}G_1^1 - \frac{1}{2}G &= -T_1^1 = +p_{xx} + \mu v_x^2 \\G_2^2 - \frac{1}{2}G &= -T_2^2 = +p_{yy} + \mu v_y^2 \\G_3^3 - \frac{1}{2}G &= -T_3^3 = +p_{zz} + \mu v_z^2 \\G_4^4 - \frac{1}{2}G &= -T_4^4 = -\mu \\G_4^1 &= -T_4^1 = -\mu v_x \\G_4^2 &= -T_4^2 = -\mu v_y \\G_4^3 &= -T_4^3 = -\mu v_z \\G_2^1 &= -T_2^1 = p_{xy} + \mu v_x v_y \\G_3^1 &= -T_3^1 = p_{xz} + \mu v_x v_z \\G_3^2 &= -T_3^2 = p_{yz} + \mu v_y v_z\end{aligned}$$

Это дает нам все уравнения, поскольку шесть, которые мы не записали, а именно

$$G_1^4 = -T_1^4; \quad G_2^4 = -T_2^4; \quad G_3^4 = -T_3^4; \quad G_1^2 = -T_1^2; \\ G_1^3 = -T_1^3; \quad G_2^3 = -T_2^3,$$

являются простыми повторениями

$$G_4^1 = -T_4^1; \quad G_4^2 = -T_4^2, \quad \text{etc.}$$

Таким образом, мы записали десять уравнений. В них μ представляет плотность материи в рассматриваемой точке; v_x, v_y, v_z , ее компоненты скорости в рассматриваемой точке, а p_{xx}, p_{xy}, p_{xz} и т. д. — деформации и напряжения, существующие в ее внутренней части. Если мы имеем дело с некогерентной материей, мы можем игнорировать эти деформации и напряжения.

Мы видим, что кривизна пространства-времени связана с различными состояниями материи. Если мы нагреваем ее, мы увеличиваем ее энергию, ее молекулы вибрируют быстрее, и кривизна пространства-времени, а значит и поле гравитации, соответственно изменяются. Мы также можем отметить, что в то время как плотность массы вещества в точке, а именно μ , влияет на кривизну $G_4^4 - \frac{1}{2}G$, компоненты импульса вещества $\mu v_x, \mu v_y, \mu v_z$ влияют на кривизны G_4^1, G_4^2, G_4^3 , а его компоненты $\mu v_x^2, \mu v_y^2, \mu v_z^2$ влияют на кривизны $G_1^1 - \frac{1}{2}G; G_2^2 - \frac{1}{2}G; G_3^3 - \frac{1}{2}G$. В то время как один тип кривизны создается массой, другой — импульсом, а третий — энергией.

Конечно, эти математические уравнения лишь выражают взаимосвязи, и на их основе невозможно сделать вывод о том, что именно масса, импульс и *vis viva* создают соответствующие искривления пространства-времени, или же эти искривления пространства-времени возникают каким-то загадочным образом и интерпретируются нашими чувствами как масса, импульс и *vis viva*. Как известно, Эддингтон предпочитает вторую точку зрения, в то время как большинство мыслителей предпочитают первую.

Следует отметить, что если мы примем точку зрения Эддингтона, то скорость (скажем, $\frac{\mu v_x}{\mu}$), равная $\frac{\mu v_x}{\mu}$, представляется как отношение двух пространственно-временных искривлений; следовательно, сосуществование двух особых типов пространственно-временного искривления будет восприниматься нашим сознанием как скорость. Поскольку скорость подразумевает течение времени, может показаться, что это загадочное течение каким-то образом связано с определенными искривлениями пространства-времени. Остается лишь сделать предположение, что весь наш воспринимаемый мир в конечном итоге может быть сведен к этим искривлениям. Мы не настаиваем на этом аспекте вопроса, во-первых, потому что не уверены, что он соответствует взглядам Эддингтона, и, во-вторых, потому что теория относительности, по крайней мере до сих пор, не смогла интерпретировать электромагнитные явления с точки зрения искривлений пространства-времени.

Но в своей книге «Пространство, время и гравитация» Эддингтон высказывает интересную идею. Он утверждает, что теперь мы можем понять, почему скорость всегда относительна, то есть не имеет смысла вне связи с материей. Дело в том, что искривления пространства-времени, такие как $G_1^1 - \frac{1}{2}G$ или G_1^1 , означают соответственно μv_x^2 и μv_x , а не просто v_x . Таким образом, наличие этих искривлений означает наличие материи вместе

со скоростью, и ни одно искривление само по себе не определяет чистую скорость без материи.

Ускорение, с другой стороны, связано с метрическими *g_{ik}* пространства-времени; и эти, конечно, существуют независимо от наличия или отсутствия материи, поскольку они представляют аспекты структуры самого абсолютного пространства-времени. Таким образом, мы понимаем, как происходит то, что ускорение проявляется как абсолютное. Взгляды Маха приводят нас к тому, что мы приписываем существование этих *g_{ik}* ускорения не самому пространству-времени, а совокупности материи Вселенной. С этой точки зрения распределение «*g_{ik}*» приобретает сходство с видом эфира, обусловленного материей, которая, в свою очередь, обуславливает поведение тел в пространстве и эволюцию явлений во времени. Однако следует подчеркнуть, что следует избегать поспешных философских выводов по этим и смежным вопросам. При нынешнем состоянии наших знаний даже самые компетентные ученые далеки от решения всех этих сложных проблем.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

ГРАВИТАЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ

С чисто математической точки зрения, без учета физических применений, мы всегда можем выбрать систему координат, или систему сеток, в континууме, независимо от того, является ли континуум евклидовым или неевклидовым. В отношении этой системы координат положение каждой точки континуума определяется ее координатами $x_1, x_2, \dots, x_n$. Их количество равно количеству измерений континуума.

В дополнение к этим координатам каждой точки существуют определенные $\frac{n(n+1)}{2}$ структурные тензоры (g_{ik}), количество которых равно $\frac{n(n+1)}{2}$ в каждой точке, где n представляет размерность континуума. Значения как тензоров (x), так и тензоров (g_{ik}) в точке будут зависеть от выбранной системы координат; но тензоры (g_{ik}) примечательны тем, что они зависят не только от системы координат, но и от структуры (изогнутой или плоской) континуума, который они определяют. Таким образом, после выбора конкретной системы координат в континууме, структура которого известна в каждой точке, значения g_{ik} в этой системе координат могут быть определены во всех точках континуума. Затем мы обнаруживаем, что квадрат расстояния между двумя бесконечно близкими точками с координатами x и $x + dx$ (а значит, с координатами, отличающимися на $dx_1, dx_2, \dots$) равен

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k,$$

где $\sum$ представляет собой сумму всех значений, относящихся к i и k . Обратите внимание, что i и k могут принимать все целые значения от 1 до n , где n — размерность континуума.

Примечательно, что только в том случае, когда континуум является плоским, это выражение для ds^2 может разбиться на сумму или разность квадратов. Когда оно разбивается на сумму квадратов, континуум называется евклидовым; когда на суммы и разности квадратов, он называется полуевклидовым и считается имеющим положительные и мнимые размерности; но во всех таких случаях он остается плоским. (Пространство-время является иллюстрацией последнего вида континуума).

А теперь предположим, что мы хотим найти уравнения геодезических линий, то есть самых прямых линий, совместимых со структурой континуума. Мы получаем геодезическую линию между двумя точками A и B , выражая тот факт, что линия, проходящая между A и B , является максимальной или минимальной. Математически это означает, что при суммировании значения ds , выраженного выше, вдоль линии, соединяющей две точки A и B , это значение должно быть больше или меньше, чем значение всех других линий, проходящих между этими двумя точками. Вариационное исчисление позволяет нам решить эту задачу. В результате мы получаем следующие уравнения, в которых координаты ($x_1, x_2, \dots$) каждой точки геодезической линии, относительно нашей системы координат, задаются следующим образом:

$$\frac{d^2 x_i}{ds^2} + \frac{1}{2} \sum g^{is} \left(\frac{\partial g_{as}}{\partial x_b} + \frac{\partial g_{bs}}{\partial x_a} - \frac{\partial g_{ab}}{\partial x_s} \right) \frac{dx_a}{ds} \frac{dx_b}{ds} = 0.$$

Эти уравнения записываются в сокращенном виде:

$$\frac{d^2 x_i}{ds^2} + \left\{ \begin{matrix} ab \\ i \end{matrix} \right\} \frac{dx_a}{ds} \frac{dx_b}{ds} = 0,$$

где i, a, b должны быть заданы целыми значениями от 1 до n ; n — размерность континуума.

Из этого следует, что, выбрав систему координат, нам остается только определить значения g_{ik} в этой системе координат, а затем подставить эти значения в выражение ds^2 и геодезических линий; тем самым будет установлена вся геометрия континуума.

До сих пор мы рассуждали так, как будто континуум обладает структурой; но в чисто аморфном континууме такой структуры не существует, и математик должен ее постулировать. Однако, когда мы имеем дело с физическим пространством, мы обнаруживаем, что законы расположения материальных стержней, а также законы движения тел (закон инерции) предполагают, что пространство является трехмерным и евклидовым. Это означает, что можно получить особую систему координат, называемую декартовой, в которой g_{ik} будут иметь постоянные значения, равные единице. Великим достижением Эйнштейна и Минковского было доказательство того, что эта концепция мира несовместима с результатами отрицательных экспериментов. Вместо этого оказалось необходимым предположить, что фундаментальное континуум является четырехмерным, обладая одним мнимым измерением, которое было ни чем иным, как временем. В этом четырехмерном пространственно-временном континууме эксперимент доказал, что ds^2 имел следующую форму, когда использовалась галилеева система отсчета:

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Мы изменили знак ds^2 , но это не имеет особого значения. Эта формула доказывает, что g_{ik} 's имеют следующие значения при вычислении в декартовой системе координат пространства-времени:

$$g_{44} = +1; \quad g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1,$$

все остальные g_{ik} исчезают. Теперь, оставляя ось времени неизменной, мы могли бы также разделить пространство, но уже не параллельными плоскостями, а концентрическими сферами и линиями, исходящими из их центра. Тогда мы получим полярную систему координат. В этом случае, пренебрегая одним из пространственных измерений для простоты и называя r расстоянием от центра, а θ углом, мы получаем

$$ds^2 = dt^2 - dr^2 - r^2 d\theta^2,$$

так что

$$g_{44} = +1; \quad g_{11} = -1; \quad g_{22} = -r^2,$$

все остальные g_{ik} исчезают. Можно отметить, что это изменение значения g_{ik} обусловлено исключительно изменением системы координат; оно ни в коей мере не связано с каким-либо изменением структуры пространства-времени. Оно остается плоским, как и прежде.

Теперь мы знаем, что в гравитационном поле пространство-время больше не является плоским; оно становится искривленным, и закон его искривления вне материи задается $G_{ik} = 0$. Но $G_{ik} = 0$ является так называемым дифференциальным уравнением в g_{ik} . Под этим мы подразумеваем, что оно содержит в своем выражении разницу значений g_{ik} в соседних точках. Однако мы хотим найти точные значения g_{ik} , а не просто разницу в их значениях. Для этого дифференциальное уравнение необходимо обработать определенным образом или, как сказали бы математики, интегрировать. Только после интегрирования можно получить решения. Все дифференциальные уравнения имеют общую черту: они дают классы решений. Чтобы выделить конкретное решение, которое отвечает рассматриваемой нами задаче, необходимо наложить на него определенные условия. В данном случае дифференциальные уравнения гравитационного поля являются уравнениями второго порядка, что означает, что необходимо наложить два отдельных условия.

Шварцшильду удалось интегрировать эти уравнения для конкретного случая радиально-симметричного поля гравитации, создаваемого массовой частицей. Плоскость пространства-времени в бесконечности, или, другими словами, вырождение $G_{ik} = 0$ до $B_{ikst} = 0$ в бесконечности, дало первое условие; второе условие было получено путем введения в решение числового значения массы m , возбуждающей гравитационное поле. Таким образом, решение стало определенным. Затем Шварцшильд обнаружил, что для полярной системы координат выражение ds^2 принимает следующую форму:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \frac{1}{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)} dr^2 - r^2 d\theta^2,$$

или, другими словами,

$$g_{44} = \left(1 - \frac{2m}{r}\right); \quad g_{11} = -\frac{1}{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)}; \quad g_{22} = -r^2,$$

все остальные g_{ik} исчезают. Мы видим, что когда m , масса частицы, исчезает, или когда r становится бесконечным, мы получаем значения плоского пространства-времени; это и должно быть так.

Теперь, когда мы располагаем этими значениями g_{ik} , все, что нам остается сделать, это ввести их в уравнения геодезических линий, и мы автоматически получим уравнения свободного движения частиц, движущихся в нашей системе координат под воздействием центральной массы m . Именно эти уравнения дают нам двойное искривление света и движение планеты Меркурий.

Можно отметить, что если мы пренебрежем влиянием, обусловленным изменениями значения g_{11} при увеличении r , то есть если мы присвоим g_{11} значение -1, которое оно имело

в плоском пространстве-времени, то мы получим приблизительно закон Ньютона. Именно отклонение g_{11} от значения -1 является отличительной чертой закона гравитации Эйнштейна. Но очевидно, что g_{11} не было скорректировано для простого удовлетворения требования учета движения Меркурия, поскольку его значение математически следует из интеграла $G_{ik} = 0$.

Можно также добавить, что уравнения гравитации $G_{ik} = 0$ не являются линейными. Простым языком это означает, что результирующее поле, создаваемое двумя массами, не может быть получено путем наложения двух отдельных полей; необходимо также учитывать дополнительные перекрестные члены. Однако в случае слабых полей эти перекрестные члены можно пренебречь, так что на практике возможно наложение отдельных полей. Тем не менее, из-за этой нелинейности гравитационных уравнений проблема двух тел (когда ни одну из масс нельзя пренебречь) представляет собой непреодолимые математические трудности. И так получается, что проблема двойных звезд, столь легко решаемая в ньютоновской науке, до сих пор не нашла решения в случае закона гравитации Эйнштейна.

Стоит отметить еще один момент. Мы видели, что было десять гравитационных уравнений и десять неизвестных величин g_{ik} , значения которых необходимо было определить. В силу того, что уравнений было столько же, сколько неизвестных, можно было бы подумать, что будет получен единственный набор значений для десяти неизвестных g_{ik} . Но поскольку значения g_{ik} , выведенные из $G_{ik} = 0$, обязательно будут различаться в зависимости от того, какую систему координат мы выберем, может показаться, что нам навязывается какая-то определенная система координат — факт, несовместимый с произвольностью системы координат, требуемой общей теорией относительности. Согласно теории относительности, поэтому должно быть четырехкратное произвольное значение g_{ik} пространства-времени, соответствующее четырем произвольно выбранным сеткам нашей системы сеток пространства-времени. Математически это означало бы, что четыре из наших гравитационных уравнений должны быть излишними, а значит, связаны друг с другом отношениями тождества. Теперь мы знаем, что четыре таких тождественных отношения действительно существуют. Физически они выражают принципы сохранения импульса и энергии. Таким образом, мы приходим к замечательному выводу, что относительность движения влечет за собой существование постоянных сущностей в мире. По словам Эддингтона:

«Этот аргумент настолько общий, что мы можем даже утверждать, что каждому абсолютному свойству объема четырехмерного мира (в данном случае *кривизне*) должны соответствовать четыре *относительных* свойства, которые сохраняются. Это может стать отправной точкой для общего исследования необходимых качеств постоянного воспринимаемого мира, *то есть* мира, субстанция которого сохраняется».^[165]

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

ПРОСТРАНСТВО, ГРАВИТАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ

Ряд философов высказали мнение, что специальная теория слишком парадоксальна, чтобы ее можно было принять, но что общая теория встречает их одобрение. Заявления такого рода необоснованны; они возникают из слишком скудного понимания механики и геометрии. Тем не менее, может быть интересно более полно исследовать эту проблему.

Специальная теория является лишь частным предельным случаем общей теории, в котором пространство-время остается плоским, а не проявляет кривизну. Именно пространство-время является источником всех парадоксов ощущений (путешествие к звезде, относительность одновременности и т. д.). И поскольку это новое континуум столь же важно для общей теории, как и для специальной, мы можем быть совершенно уверены, что все парадоксы специальной теории сохранятся в обобщенном случае, однако усугубятся дополнительным элементом сложности, создаваемым кривизной. Короче говоря, отказ от пространства-времени повлек бы за собой крах как общей, так и специальной теорий. Подобным образом, если бы не было омлета, яйца все равно остались бы, но если бы изначально не было яиц, то, конечно, не было бы и омлета. Действительно, мы можем резюмировать работу Эйнштейна, сказав, что в специальной теории было открыто пространство-время, а в общей теории были математически исследованы его возможности.

Однако мы можем рассмотреть эту проблему с другой стороны. Главным достижением общей теории стало объяснение гравитации чисто геометрическим способом с точки зрения кривизны фундаментального континуума (в данном случае пространства-времени). Но мы можем проверить, не были бы ли достигнуты аналогичные результаты, если бы мы довольствовались классической картиной отдельного пространства и времени. В таком случае гравитация объяснялась бы только с точки зрения кривизны пространства, а пространство-время было бы устранено вместе с парадоксами ощущения, которые оно влечет за собой. Однако мы увидим, что существует ряд причин, которые сделали бы успех в этом направлении невозможным. Но ситуацию нельзя прояснить с помощью одних лишь философских рассуждений, поэтому необходимо небольшое отступление.

Когда Галилей и Ньютон начали свои эпохальные открытия в механике, они предполагали, что пространство является трехмерным и евклидовым. Но когда мы говорим, что пространство является евклидовым, что мы имеем в виду? Мы имеем в виду, что если бы можно было проводить идеально точные измерения, то были бы получены числовые результаты чистой евклидовой геометрии. Поэтому, если при проведении измерений с помощью материальных стержней отмечаются небольшие расхождения, мы будем предполагать, что из-за тех или иных случайных влияний () наши стержни не соответствуют стандарту.

Теперь очевидно, что, провозглашая пространство *априорно* евклидовым, а затем возлагая вину на наши физические измерения, если наше *априорное* предположение не подтверждается на практике, мы ставим себя в положение, которое является неприступным, но бесполезным. Мы заявляем, что знаем все, прежде чем начать, и тем самым лишаем себя помощи эксперимента в нашем изучении природы.

Поэтому может показаться странным, что Ньютон, великий эмпирик, следовал *априорной* процедуре, с которой он никогда не устал бороться в науке. Но здесь мы должны помнить,

что в дни Ньютона евклидово пространство было единственным известным типом; поэтому оно считалось аксиоматическим не только Кантом, но, что еще более важно, самыми компетентными математиками XVII и XVIII веков. Ввиду этой предполагаемой неизбежности евклидовой геометрии предполагалось, что если геометрия пространства должна иметь какой-либо смысл, то она не может не быть евклидовой. И поэтому опасность *априорного* подхода к геометрии пространства не произвела должного впечатления.

Но вся ситуация изменилась, когда была открыта неевклидова геометрия. Поскольку теперь было установлено, что могут существовать различные типы пространств, было невозможно *априори* предсказать, какой из этих возможных типов будет реализован в природе. Таким образом, евклидова геометрия лишилась своего статуса неизбежности. Отныне единственным средством определения геометрии пространства было обращение к физическим измерениям; и геометрия пространства была бы геометрией лучей света и материальных тел, поддерживаемых в постоянных условиях температуры и давления.

Однако допустимо задаться вопросом, могут ли такие физические измерения когда-либо научить нас чему-либо о геометрии пространства; можно утверждать, что они дают лишь информацию о поведении лучей света и материальных тел. Такова была позиция Пуанкаре. Но мы видели, что если нам отказано в помощи физических измерений, геометрия пространства полностью ускользает от нас, и больше не о чем спорить. Учитывая различные типы, которые рационально возможны, любой вид, который мы могли бы выбрать, имел бы характер произвольного определения, а значит, был бы чисто условным. Было бы так же бесполезно пытаться доказать, что наше определение неверно, как утверждать, что система чисел должна быть десятичной, двоичной или двенадцатеричной; в таких случаях нас может руководствовать только *удобство*.

Но когда мы анализируем, что подразумевается под словом «удобство», мы видим, что в конечном счете оно часто основано на результатах физических измерений. Таким образом, если бы все физические измерения давали неевклидовые результаты, если бы все законы природы можно было бы выразить более просто с помощью той же неевклидовой геометрии, то, безусловно, было бы более удобно приписать пространству неевклидову структуру. По той же причине более удобно приписывать пространству три измерения, поскольку эта гипотеза позволяет нам очень просто объяснить нашу неспособность выйти из закрытой комнаты, не открыв дверь или окно. Причина, по которой в данном случае все еще используется слово «удобно», заключается в том, что все еще возможно объяснить наблюдаемые факты с помощью, скажем, четырехмерного пространства, при условии, что мы готовы изменить наше фундаментальное отношение упорядочения и вместе с ним наше понимание тождества.

Мы можем обобщить эти утверждения, сказав, что «реальность» для ученого сводится к простейшей координации экспериментальных фактов и что, учитывая различные возможные типы пространств, предлагаемые неевклидовой геометрией, физические измерения являются нашим единственным средством определения, какое из них является простейшим, а значит, и реальным решением. Это объясняет, почему Гаусс (который еще в 1804 году в тайне освоил основы неевклидовой геометрии) стремился установить геометрию пространства с помощью триангуляции лучей света. Но в дни Ньютона слияние геометрии и физики не рассматривалось, поскольку евклидова геометрия считалась единственно возможным типом. Кроме того, чем тщательнее проводились измерения, тем ближе были результаты к результатам чистой евклидовой геометрии; и поэтому казалось вполне разумным предположить, что пространство является евклидовым.

Мы сочли необходимым напомнить об этих фундаментальных понятиях ввиду их важности для последующих обсуждений. Но пока вернемся к проблеме, как она стояла во времена Ньютона, когда неевклидова геометрия была неизвестна, а пространство считалось евклидовым. В частности, мы кратко рассмотрим основы рациональной механики.

Во всех задачах движения необходимо указать систему отсчета, в которой будут вычисляться движения тел, поскольку измеримые скорости и ускорения зависят от нашего выбора этой системы. Следуя предложению Коперника, ученые определили стандартную систему отсчета как такую, в которой звезды кажутся неподвижными или, по крайней мере, не вращающимися. Система такого рода называется *инерциальной* или *галилеевой*.

Помимо выбора системы отсчета, измерение движения требует измерения как пространства, так и времени. Евклидова геометрия придавала значение равенству двух пространственных расстояний, измеренных в нашей галилеевой системе отсчета. С высокой степенью приближения предполагалось, что равные пространственные расстояния определяются смещением одного и того же материального стержня, поддерживаемого в стандартных условиях. Что касается измерений во времени, то предполагалось, что они даются часами, регулируемые в конечном счете вращением Земли.

Поскольку операции измерения были таким образом определены физически, и Галилей, и Ньютон считали, что на основании эмпирических данных можно утверждать, что свободное тело, движущееся без воздействия сил, будет двигаться по прямой с постоянной скоростью. Это утверждение составляет *закон инерции*. Тем не менее, эмпирические методы, с помощью которых Галилей и Ньютон вывели закон инерции, были чрезвычайно грубыми. Дело было не только в более или менее неточных физических измерениях, но, что еще хуже, невозможно было рассматривать абсолютно свободные тела, поскольку невозможно было устранить влияние силы тяжести Земли () и трения. Отсюда следует, что закон инерции не мог претендовать на *прямое* эмпирическое обоснование.

Но, с другой стороны, если механика должна была развиваться по математическим принципам, было необходимо принять определенные строгие предпосылки. Ньютон не мог довольствоваться утверждением, что свободные тела движутся более или менее по прямой с более или менее постоянной скоростью. Отсюда возникла необходимость возвысить закон инерции до уровня принципа. Таким образом, принцип, хотя изначально и был выведен как обобщение опыта, теперь занял место определения движения *свободного тела*. Поэтому, когда тело, казалось, отклонялось от требований принципа, считалось, что оно не может быть свободным; точно так же, когда стержни не давали идеально евклидовых результатов, предполагалось, что они не могут быть идеально жесткими (поскольку в классической науке евклидовость пространства была принята в качестве принципа).

Поскольку принцип инерции был сформулирован таким образом, мы видим, что он дает нам идеальное определение времени, поскольку, по определению, абсолютно свободное тело описывает равные евклидовы расстояния в строго равных промежутках времени. Благодаря принципу инерции Ньютон дал точное (хотя и идеальное) определение времени.

В дополнение к этому первому принципу необходимо было рассмотреть два других, также полученных как обобщения из опыта, а именно: принцип силы и ускорения и принцип действия и противодействия. Эти три основных принципа составляют основу рациональной механики.

С этого момента механика, изначально бывшая эмпирической наукой, становится рационализированной и опирается на математическую основу. Теперь она может развиваться без дальнейшего обращения к опыту, с помощью чисто математических

методов.^[166] По этой причине она называется *рациональной механикой*. Однако, если мы рассматриваем механику солнечной системы, необходимо получить дополнительную эмпирическую информацию. Данные наблюдений были предоставлены Тихо Браге и Кеплером. На основании этой информации Ньютон вывел закон всемирного тяготения. Поэтому, когда взаимная сила, действующая между телами, имеет обратно пропорциональную квадрату расстояния форму, мы получаем особую отрасль математической механики, называемую *небесной механикой*.

Из сказанного мы понимаем, что решения этих задач рациональной и небесной механики носят чисто математический характер и сопряжены с собственными техническими трудностями. Поэтому не стоит удивляться, что на каждой странице трактатов, посвященных этим сложным наукам, встречаются имена чистых математиков. Так, в рациональной механике мы находим великие имена Ньютона, Эйлера, д'Аламбера, Лагранжа и Гамильтона, а в небесной механике — не менее великие имена Лапласа, Якоби и Пуанкаре. Мы подчеркнули эти моменты, чтобы показать, как механика, изначально бывшая эмпирической наукой (), со временем стала математической.

Теперь, по крайней мере теоретически, чистому математику неинтересно знать, соответствуют ли эти математические спекуляции каким-либо образом работе реального мира; и независимо от того, верны ли законы Ньютона или нет, решение проблемы n тел, действующих в соответствии с законом обратных квадратов Ньютона, по-прежнему представляет значительный интерес. Но, с другой стороны, было бы серьезной ошибкой предполагать, что эти заумные математические проблемы являются лишь интеллектуальным развлечением, кроссвордами высшего порядка. Рациональная и небесная механика претендуют на соответствие реальному функционированию мира. Единственный способ проверить справедливость этого утверждения — постоянно сверять прогнозы теории с результатами наблюдений.

Если эта проверка покажет, что между теорией и наблюдениями существует гармония, мы можем предположить, что наши фундаментальные принципы верны. Если нет, то есть три варианта: либо мы признаем, что наши фундаментальные принципы ошибочны, и попытаемся заменить их другими; либо мы сохраним наши фундаментальные принципы и приведем теорию в соответствие с наблюдениями, введя подходящие возмущающие влияния или гипотезы *ad hoc*; наконец, мы можем предположить, что природа иррациональна и поэтому не поддается математическому исследованию.

В этом отношении невозможно дать какое-либо золотое правило. Гипотеза о Нептуне была иллюстрацией второго подхода, когда были введены возмущающие влияния, а основные принципы были сохранены. Теория Эйнштейна является примером первого подхода, когда от фундаментальных принципов отказались. Что касается третьего подхода, то он будет принят только в крайнем случае, поскольку будет равносильен сдаче. Тем не менее, далеко не факт, что в конечном итоге нам не придется смириться с такой позицией, когда наши наблюдения будут касаться явлений микроскопического масштаба.

Возвращаясь к науке Ньютона, можно сказать, что до недавнего времени фундаментальные принципы рациональной механики, казалось, не были под угрозой. Наиболее точные астрономические наблюдения давали результаты, полностью соответствующие теоретическим прогнозам, если учитывать минимальные возмущающие влияния и неизбежную неточность в наших знаниях о массах планет. Таким образом, мы понимаем, откуда берет свое начало обоснование закона инерции и, следовательно, классических определений времени и пространства.

Закон инерции был признан не потому, что камни, брошенные на лед, казалось, летели по прямой траектории с постоянной скоростью, ведь камни в конце концов останавливаются. Это произошло потому, что многочисленные следствия этого закона, казалось, подтверждались косвенно с высокой степенью точности. Следовательно, хотя, несомненно, верно сказать, что фундаментальные принципы механики были не чем иным, как рискованными обобщениями на основе чрезвычайно грубых наблюдений, их обоснование, по крайней мере до недавнего времени, казалось установленным *апостериорно*.

Из принципов механики можно вывести один очень общий принцип. Речь идет о принципе *наименьшего действия* (), альтернативные формы которого даны принципом Гамильтона и принципом Гаусса о минимальном усилии. Любой из этих общих принципов включает в себя все принципы механики в очень сжатой форме. Принцип наименьшего действия позволяет нам предвидеть следующий результат: свободные тела, на которые не действуют силы, неизменно движутся по геодезическим линиям с постоянной скоростью. Даже когда тела свободны лишь частично, как, например, когда они вынуждены двигаться по фиксированной поверхности (без трения), они неизменно будут двигаться по геодезическим линиям поверхности, также с постоянной скоростью.

Здесь, возможно, необходимо дать небольшое пояснение. Геодезические линии трехмерного евклидова пространства — это привычные нам евклидовы прямые линии, и наше предыдущее утверждение является лишь представлением закона инерции. Но когда мы рассматриваем кривую поверхность, прямые линии пространства не могут лежать на ее поверхности. Геодезические линии кривой поверхности больше не являются прямыми линиями в евклидовом смысле, но они являются наибольшим приближением к таким линиям, т. е. наименее изогнутыми из всех линий, которые можно проследить на кривой поверхности. В случае сферы геодезические линии являются большими кругами. Все поверхности имеют геодезические линии, более или менее причудливо искаженные по форме в зависимости от изменения кривизны в разных точках поверхности. Опять же, как и в случае трехмерного пространства, геодезическая линия — это кратчайшая линия между двумя точками поверхности (когда расстояние вычисляется по поверхности).^[167]

Нерастяжимая нить, натянутая между двумя точками на кривой поверхности, лежит вдоль геодезической линии. Конечно, на практике было бы трудно добиться прилегания нити к поверхности, если бы поверхность была вогнутой. Но эту трудность можно устранить, если рассмотреть вторую поверхность, прилегающую к исходной. Тогда нить будет натянута в промежутке между двумя поверхностями, а тело, движущееся по поверхности, будет представлено маленьким шариком, катящимся без трения в промежутке между двумя поверхностями. Таким образом, шарик всегда будет оставаться в контакте с поверхностью.

Таким образом, можно сказать, что в отсутствие сил — например, внутри падающего лифта — шарик, если он запущен с некоторой начальной скоростью, будет описывать ту геодезическую поверхность, которая лежит по касательной к его начальной скорости. Кроме того, скорость шарика по геодезической линии будет оставаться постоянной (при отсутствии трения).

Итак, если бы мы обнаружили одну из геодезических поверхности, натянув нить, и отметили бы положение этой геодезической чернилами, то обнаружили бы, что мяч, принужденный двигаться без трения по поверхности, следовал бы по этой линии, при условии, что его начальная скорость была бы направлена тангенциально к ней. По сути, геодезические линии действуют как канавки, направляющие движение свободных тел, и

свободные тела следуют по этим канавкам с любой начальной скоростью, которую мы им придали. Все эти соображения применимы только в том случае, если на движущееся тело не действуют внешние силы. Наличие силы отрывает тело от геодезической линии, по которой оно обычно двигалось бы, а также ускоряет его скорость.

Теперь мы подошли к закону всемирного тяготения Ньютона. Примечательным фактом было то, что, хотя согласно закону инерции движения свободных тел должны быть направлены по прямым геодезическим линиям трехмерного евклидова пространства, траектории и движения планет вокруг Солнца и снарядов вблизи поверхности Земли сильно отклонялись от этих геодезических путей. В случае снарядов причину этого отклонения было легко обнаружить. Оно объяснялось воздействием силы гравитации, действующей в окрестностях Земли. Но в случае планет это расхождение было сложнее объяснить. Ньютон решил эту проблему, расширив сферу действия гравитации, а именно, предположив, что на планеты действует гравитационная сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния и направленная к Солнцу. Таким образом, он смог объяснить эллиптические орбиты планет, а также их движения по этим орбитам, как это было указано в законах Кеплера.

Таким образом, в классической науке мы сталкивались с прямыми геодезическими линиями и силами, исходящими от материи и заставляющими тела отклоняться от своих нормальных геодезических траекторий при движении вблизи материи.

Но мы, которые, в отличие от Ньютона, знаем о неевклидовой геометрии, можем быть склонны предложить другое решение проблемы гравитации. С точки зрения неевклидовой геометрии, движение точки по поверхности (обсуждавшееся ранее) можно интерпретировать как свободное движение точки в двумерном неевклидовом пространстве (пространстве поверхности). Следовательно, мы можем сказать, что независимо от того, является ли пространство евклидовым или неевклидовым, принцип наименьшего действия требует, чтобы свободные тела следовали его геодезическим линиям с постоянной скоростью. Это верно независимо от размерности пространства, откуда мы можем сделать вывод, что если бы наше трехмерное пространство было неевклидовым, а не евклидовым, закон инерции Ньютона пришлось бы пересмотреть. Больше не было бы правильным утверждать, что свободные тела описывают *евклидовы прямые линии* с постоянной скоростью. Вместо этого мы должны сказать: «Свободные тела движутся *по геодезическим линиям пространства* с постоянной скоростью».

Благодаря этому обобщению закона инерции мы можем распространить классическую механику на пространства всех видов. Только в частном случае, когда пространство является евклидовым, наш обобщенный закон инерции совпадает с законом, данным Ньютоном.

С точки зрения наблюдения, каким был бы результат проявления пространства как неевклидова? Геодезические линии были бы искривлены, в отличие от евклидовых, и свободные тела, не подверженные воздействию сил, казались бы следующими по кривым с постоянной скоростью. В этих условиях казалось бы возможным объяснить искривленные траектории планет и снарядов без введения возмущающей силы гравитации. Все, что нам нужно сделать, это предположить, что пространство было соответствующим образом искривлено вокруг больших масс, таких как Солнце и Земля; в результате геодезические линии, а значит и траектории свободных тел, были бы искривлены. В частности, планеты теперь вращались бы вокруг Солнца не потому, что притяжение Солнца заставляло их делать это, отрывая их от прямых геодезических линий, а потому, что пространство вокруг Солнца теперь искривлено, и его геодезические линии автоматически становились бы искривленными линиями.

Идеи такого рода были предварительно выдвинуты Лобачевским, Риманом и Клиффордом; но, как мы объясним далее, решение по этому пути было физически и математически невозможно, пока мы ограничивали наши исследования отдельным пространством и временем классической науки.

Первая трудность возникла бы, если бы мы сравнили исследование метрики пространства методом измерения стержней с исследованием свободных тел, следующих по геодезическим линиям. Мы помним, что, обсуждая свободное движение шара, ограниченного движением по кривой поверхности, мы сказали, что шар будет описывать кратчайший путь между двумя точками на поверхности, другими словами, геодезическую линию; что если бы мы натянули нить между этими двумя точками на поверхности, нить, в свою очередь, расположилась бы вдоль той же геодезической линии (именно в этом смысле геодезическая линия могла считаться определяющей кратчайшую линию между двумя точками на поверхности). Короче говоря, измерения с помощью стержней или движения тел давали одинаковую геометрию, одинаковую метрику для двумерной поверхности. Аналогичные соображения применимы к трехмерному пространству.

Но с нашей предварительной теорией гравитации это согласие исчезло бы, и мы столкнулись бы с невыносимым дуализмом. Рассмотрим, например, случай камня, брошенного в воздух; он описывает параболу. Согласно нашим нынешним представлениям, мы должны были бы предположить, что эта парабола представляет собой геодезическую линию трехмерного пространства и, следовательно, кратчайшее расстояние между двумя точками на траектории. Но очевидно, что если бы между точкой отправления и точкой падения камня была натянута нить, она никогда не совпала бы с параболической траекторией. Точно так же расстояние между двумя точками на орбите Земли — скажем, с интервалом в шесть месяцев — не определяется линией орбиты. Таким образом, геометрия пространства, установленная свободно движущимися телами, была бы несовместима с геометрией, установленной измерениями с помощью стержня. В первом случае проявился бы интенсивный неевклидов характер, тогда как во втором случае пространство казалось бы евклидовым.

В таких условиях было бы трудно понять, каким аргументом мы могли бы обосновать утверждение, что кривая параболы является геодезической линией и, следовательно, представляет собой кратчайшее пространственное расстояние между двумя точками на траектории. Короче говоря, мы столкнулись бы с дуализмом, существующим между измерениями с помощью мерной линейки и исследованиями с помощью движущихся тел. Поскольку наука постоянно стремится устранять дуализм, где это возможно, и устанавливать единство, можно предположить, что интерпретация гравитации в соответствии с вышеизложенным не имела бы шансов быть принятой учеными. Скорее они сохранили бы евклидово пространство Ньютона, которое идеально объясняет результаты измерений с помощью стержней и триангуляции лучей света, а затем обратились бы к дополнительной силе гравитации, действие которой заключалось бы в отрыве тел от прямых геодезических линий, по которым они обычно двигались бы.

Кроме того, у этой проблемы есть еще один аспект. Если мы предположим, что движущиеся точки описывают геодезические линии в неевклидовом пространстве, которое имеет высокую степень неевклидовости, мы должны признать, что наши материальные тела (которые ведут себя евклидово) должны сильно отклоняться от стандарта при смещении. Если же мы рассмотрим поступательное движение большой невращающейся массы, все ее молекулы должны описывать геодезические линии. Но это было бы невозможно, поскольку из-за огромных вариаций в форме тела по сравнению с геометрией пространства большинство молекул были бы вырваны из своих естественных траекторий. В

результате возникли бы огромные силы реакции, в результате чего тело было бы либо разорвано, либо раздавлено, либо вообще неспособно двигаться.

Однако с пространством-временем все эти недостатки устраняются, поскольку не возникает дуализма между измерениями с помощью стержней и траекториями свободных тел. В теории Эйнштейна свободные тела следуют геодезическим линиям пространства-времени, *а не пространства*. Это искривление пространства-времени достаточно для объяснения движений снарядов и планет; и когда пространство-время разделяется на пространство и время, мы обнаруживаем, что в ограниченных областях геодезические линии пространства остаются евклидовыми прямыми линиями (благодаря огромному значению c), как в классической науке. По этой причине вполне логично, что, несмотря на *кривизну пространства-времени*, измерения с помощью стержней и натянутых струн дают евклидовые результаты.

Таким образом, мы видим, что в теории Эйнштейна метрика пространства-времени позволяет нам учитывать как гравитацию, так и результаты обычных измерений с помощью стержней. Она также позволяет нам координировать временные процессы, как показано в эффекте сдвига Эйнштейна. Короче говоря, с отказом от пространства-времени единство природы, раскрытое теорией относительности, было бы утрачено.

Рассмотрим теперь второе возражение против гипотезы о кривизне пространства. Закон движения падающих тел касается не только пространственных траекторий. Например, снаряды описывают параболы, но их движения по этим траекториям столь же характерны, как и формы самих траекторий. Опять же, в случае с планетами мы рассказываем только половину истории, когда утверждаем, что они описывают эллипсы вокруг Солнца, расположенного в одной из фокусов. Именно из такого неполного утверждения Ньютон и смог вывести свой закон обратной квадратичной зависимости. Второй и третий законы Кеплера дополняют описание движения планет, определяя природу движения и скорости планет по их эллиптическим орбитам. Только при учете всех трех законов Кеплера можно однозначно вывести закон всемирного тяготения Ньютона. Например, если бы планеты двигались по своим эллиптическим орбитам с постоянной скоростью, закон Ньютона не смог бы объяснить их движения.

Обращаясь к нашей предварительной схеме гравитации в терминах искривленного пространства, мы видим, что в ней нет ничего, что указывало бы на своеобразные ускоренные движения планет и снарядов, так что мы не можем объяснить все эффекты, которые Ньютон приписывал гравитации. Хуже того, согласно теории искривления пространства, движения тел по своим траекториям были бы равномерными, поскольку геодезические линии описываются с постоянной скоростью. А это полностью противоречило бы ускоренным движениям падающих тел и планет.

Однако мы могли бы найти выход из положения, утверждая, что искривление пространства объясняет ускоренное движение этих тел, так же как кажущаяся скорость тела зависит от его ориентации по отношению к нашей линии зрения. Безусловно, кривизна пространства повлекла бы за собой визуальное искажение такого рода, поскольку лучи света, исходящие от светящегося источника, теперь достигали бы нас по кривым траекториям. В результате мы бы неправильно оценивали положение источника, как это происходит в случае рефракции. Этот эффект необходимо учитывать, например, в цилиндрической вселенной Эйнштейна. Расстояния до звезд, вычисленные на основе измерения их параллаксов, должны быть несколько уменьшены из-за сферической кривизны пространства. Отсюда следует, что звезда, удаляющаяся от нас по радиусу с

постоянной скоростью, будет казаться ускоряющейся по мере удаления от нас, как будто она отталкивается от точки, в которой мы находимся.^[168]

Но очевидно, что если сохранить раздельное пространство и время, то наше убеждение в ускоренном движении тел, падающих в гравитационном поле, ни в коем случае не может быть отнесено к эффектам, вызванным оптическими искажениями, изменяющимися в зависимости от относительного положения наблюдателя. Эти ускорения являются объективными в том смысле, что они существуют в одинаковой степени для всех наблюдателей в объективном пространстве и времени научного мира. Возьмем простой случай: если мы позволим камню упасть на нашу ногу, его скорость удара будет зависеть от высоты, с которой он был брошен. Мы не можем сказать, что эти изменения скорости следует объяснять просто оптическим искажением лучей света, отраженных от камня. Мы знаем, что, помимо визуального образа движения, об этом говорит боль, которую мы испытываем. В дополнение ко всем этим соображениям, было бы совершенно невозможно объяснить точное ускорение падающих тел и планет, даже если бы мы интерпретировали их с помощью оптических искажений.

Итак, мы видим, что лучшее, на что можно было бы надеяться от одной только кривизны пространства-времени (), — это объяснение точных траекторий падающих тел, но не их движения по этим траекториям. Следовательно, нам не удалось бы интерпретировать гравитацию, поскольку, опять же, движение по траекториям так же важно, как и пространственная форма этих траекторий. Закон Ньютона, с другой стороны, объясняет и траектории, и движения.

Но мы можем рассмотреть другой способ выхода из положения. Мы могли бы предположить, что пространственные геодезические линии, по которым движутся свободные тела, действуют не только как канавки, но и как артерии, которые продвигают кровь благодаря своим расширениям и сокращениям. Тогда мы могли бы предположить, что эти пульсации геодезических линий придают планетам и снарядам те точные изменения в движении, которые наблюдаются. Само собой разумеется, что эта гипотеза была бы абсурдной и бесполезной и, насколько известно автору, к счастью, никогда не выдвигалась. В любом случае, даже с этой гипотезой *ad hoc*, мы не смогли бы объяснить гравитацию с точки зрения искривления пространства, поскольку были бы вынуждены ввести это дополнительное влияние. Кроме того, поскольку в отсутствие притягивающих масс свободные тела не ускоряются, мы должны были бы предположить, что в отсутствие притягивающих масс эти пульсации геодезических линий прекратились бы; следовательно, именно действие материи вызывало бы пульсации. Другими словами, то, что мы раньше называли силой гравитации, теперь называлось бы силой пульсации, и мы вернулись бы к ньютоновскому закону гравитации под новым названием, несмотря на нашу абсурдную гипотезу *ad hoc*.

С пространством-временем все эти трудности снова устраняются, поскольку геодезические линии пространства-времени, в отличие от геодезических линий пространства, учитывают как траектории тел, так и их точные движения по этим траекториям. Это связано с тем, что геодезическая линия пространства-времени имеет дело как со временем, так и с пространством.

До сих пор мы видели, что одним из главных препятствий для теории гравитации, основанной на искривлении пространства, была ее неспособность учитывать точные движения тел по их орбитам или траекториям. Однако, с другой стороны, если бы не другие трудности, упомянутые ранее в этой главе, возможно, не казалось бы невозможным учесть пространственные формы орбит тел в гравитационном поле. Теперь мы предлагаем

показать, что, совершенно независимо от уже приведенных причин, даже этот частичный успех никогда не может быть реализован. Здесь, однако, мы вынуждены рассмотреть более математический аспект проблемы.

Сначала рассмотрим обычное трехмерное евклидово пространство. Если мы выберем произвольно точку P , то знаем, что существует тройная бесконечность прямых, проходящих через P . Но если мы наложим ограничение, что все эти прямые должны быть перпендикулярны некоторому произвольному направлению PQ , то количество возможных прямых уменьшится. В совокупности они теперь образуют плоскость, проходящую через P и перпендикулярную PQ .

Аналогичные рассуждения можно применить к любому n -мерному пространству, будь то евклидово или неевклидово. Но если пространство неевклидово, то наши прямые линии, или геодезические линии, будут искривлены с евклидовой точки зрения. Таким образом, мы видим, что геодезические линии, проходящие через P и перпендикулярные в P направлению PQ , теперь будут образовывать кривую поверхность, а не плоскость, как в евклидовом пространстве. Поверхность такого рода, образованная геодезическими линиями, называется *геодезической поверхностью*; и та, которую мы рассматриваем, будет геодезической поверхностью, проходящей через P и перпендикулярной направлению PQ в точке P . Таким образом, мы видим, что в евклидовом пространстве геодезические поверхности являются плоскостями, так же как геодезические линии являются прямыми линиями; тогда как в неевклидовом пространстве геодезические поверхности являются кривыми, так же как геодезические линии являются кривыми.

Если теперь предположить, что направление PQ поворачивается вокруг P , то для каждой новой ориентации PQ мы получим новую геодезическую поверхность. В случае евклидова пространства эти поверхности всегда будут плоскостями, но в неевклидовом пространстве различия различных поверхностей в точке P может изменяться в зависимости от ориентации PQ , а также от положения точки P . Затем Риман определил кривизну пространства в точке P в направлении PQ по кривизне геодезической поверхности, проходящей через P и перпендикулярной PQ в точке P . Таким образом, мы видим, что в то время как двумерная поверхность имеет только одну кривизну в каждой точке, трехмерное пространство имеет различные кривизны в одной точке, в зависимости от направления, в котором вычисляется кривизна. Если для всех ориентаций PQ и для всех точек P кривизна геодезической поверхности остается одинаковой, то мы имеем пространство постоянной кривизны. Когда геодезические поверхности являются сферами с одинаковым радиусом, а значит, поверхностями с одинаковой положительной кривизной, мы имеем сферическое пространство; когда они являются псевдосферами, а значит, поверхностями с постоянной отрицательной кривизной, мы имеем пространство Лобачевского, а когда они являются плоскостями, а значит, поверхностями с постоянной нулевой кривизной, мы имеем евклидово пространство.

Остается сказать, что, как обнаружил Риман, эти кривизны пространства в точке могут быть полностью описаны только с помощью тензора Римана-Кристоффеля B_{ikst} в каждой точке. По этой причине тензор Римана-Кристоффеля является единственным, который позволяет нам полностью определить природу пространства.

А теперь вернёмся к теории гравитации с кривизной пространства. Поскольку орбиты свободных тел не имеют постоянной кривизны, мы должны иметь дело с пространством, кривизна которого меняется от места к месту. Само по себе это не является недостатком. Но здесь возникает трудность: рассмотрим точку P над поверхностью Земли и пусть PQ направлена по вертикали. Тогда геодезическая поверхность, перпендикулярная PQ в точке

P , содержит все геодезические линии, проходящие через P и изначально направленные в горизонтальном направлении, параллельном поверхности Земли. Рассмотрим, в частности, одну из этих геодезических линий, скажем, ту, которая проходит с востока на запад. Существует одна и только одна такая геодезическая линия, проходящая через P и начинающаяся горизонтально с востока на запад. Согласно нашей предварительной теории гравитации, это означало бы, что существует только один путь, по которому тело может двигаться, если оно брошено горизонтально из точки P в западном направлении. Но мы знаем, что это не так, поскольку, изменяя начальную скорость тела, мы получаем бесконечное множество парабол; отсюда мы должны сделать вывод, что невозможно отождествить пространственные траектории тел, выпущенных из точки P , с геодезическими линиями искривленного трехмерного пространства. Но мы видели, что, если мы не вводим силы, принцип наименьшего действия требует, чтобы свободные тела описывали геодезические линии. Кроме того, геодезические линии являются единственными линиями, обладающими абсолютным структурным значением. Если же тела, движущиеся в гравитационном поле, не следуют по ним, мы не можем отнести траектории этих тел к внутренней геометрии пространства. Мы снова вынуждены обратиться к силе гравитации, как это сделал Ньютон, и вся наша теория рушится. Чтобы успешно отождествить траектории тел в гравитационном поле с геодезическими линиями континуума, необходимо ввести четвертое непространственное измерение. Только так мы можем получить бесконечное число геодезических линий, необходимое для бесконечного числа траекторий, по которым, как известно, движутся тела. И здесь снова пространство-время решает все наши проблемы.

Подводя итог, можно сказать, что большая заслуга общей теории Эйнштейна заключается в том, что его закон кривизны пространства-времени, $G_{ik} = 0$ (практически единственный возможный), дает нам не только движения тел, а значит, закон гравитации, но и метрические свойства фундаментального континуума. Под этим мы подразумеваем, что закон кривизны пространства-времени позволяет нам предсказывать точные результаты измерений с помощью стержней и точные темпы временной эволюции процессов, происходящих в различных частях гравитационного поля. Благодаря закону кривизны мы знаем, что атом должен биться здесь быстрее, чем там, а значит, его свет должен изменяться по цвету. Это, конечно, знаменитый эффект Эйнштейна, наблюдаемый астрономами. Важность, которую Эйнштейн придает этому явлению, ясно иллюстрируется тем, что в 1918 году, до того как сдвиг был наблюден, он писал: «Если смещение спектральных линий в красную сторону под действием гравитационного потенциала не существует, то общая теория относительности будет несостоятельной».

Таким образом, мы видим, что это слияние геометрии и физики, эта связь механики и гравитации с геометрией, или метрикой, пространства и времени, составляет один из самых прекрасных аспектов общей теории. Она подчеркивает степень единства в природе, о которой до сих пор и не мечтали. Если бы не это великолепное единство, если бы измерения с помощью стержней и часов не были в полной гармонии с движениями тел, теория была бы отвергнута. В любом случае, приведенный выше отрывок выражает личное отношение Эйнштейна к этому вопросу.

Наконец, мы можем рассмотреть еще один недостаток гипотезы о кривизне пространства. Каким бы ни был закон кривизны, он состоял бы в некотором трехмерном тензорном законе — скажем, $G_{ik} = \lambda g_{ik}$, ограниченном только пространством. Но тензорный закон такого рода, оставаясь ковариантным для любого изменения ориентации нашей пространственной системы отсчета, перестал бы проявлять это свойство при отнесении к движущейся системе отсчета. Признается, что само по себе это ни в коем случае

не является решающим аргументом против гипотезы искривления пространства, поскольку ковариантность законов природы для всех наблюдателей, независимо от движения, не является условием, которое каким-либо образом навязывается нам *априори*. Классическая наука, например, не предполагала такой ковариантности. Тем не менее, следует признать, что теория относительности Эйнштейна (), позволяя нам установить эту нерелевантность законов природы по отношению к движению наблюдателя, достигла результата, который с философской точки зрения является убедительным. И снова эта ковариантность влечет за собой пространство-время.

Таким образом, мы привели ряд аргументов, доказывающих невозможность объяснить гравитацию с точки зрения искривления пространства. За исключением последнего аргумента, можно с уверенностью сказать, что любой из предыдущих аргументов доказал бы эту точку зрения к удовлетворению ученых. Мы могли бы упомянуть ряд других причин, но обсужденные аргументы кажутся достаточными. Таким образом, мы видим, почему идеи Римана и Клиффорда не могли быть реализованы в их время, когда пространство-время еще не было известно. И поэтому концепция Ньютона о силе, исходящей из материи и действующей в трехмерном евклидовом пространстве, не подвергалась опасности быть опровергнутой.

СНОСКИ:

[1] Как показано на примере открытия Пифагором связи между длиной колеблющейся струны и высотой ее звука, открытие, которое было использовано в музыкальных инструментах. Другим примером является решение Архимедом задачи о золотой тиаре Иерона.

[2] Название «*галилеево движение*» не получило широкого распространения. Однако, поскольку это название более кратко для обозначения «равномерного поступательного движения», мы будем придерживаться его.

[3] Здесь нет необходимости обсуждать сложные проблемы, связанные с связностью континуумов. Например, точка на замкнутой линии не делит линию на две части, и тем не менее линия остается одномерной. Проблемы такого рода относятся к одной из самых сложных областей геометрии, а именно к аналитической геометрии, с которой связаны имена Римана, Бетти и Пуанкаре.

[4] Открытия дю Буа Реймона показали, что мы могли бы пойти еще дальше и ввести неопределенное количество дополнительных точек, но в современном состоянии математики это расширение рассматривается лишь как математическая курьезная особенность. Однако можно упомянуть, что отказ Гильберта от аксиомы Архимеда (которая будет обсуждаться в следующей главе), приводящий к странной неархимедовой геометрии, был бы эквивалентен рассмотрению математического континуума как более общего вида.

[5] То, что выбор отношения упорядочения имеет первостепенное значение для определения размерности, можно понять из следующих примеров. Рассмотрим несколько камертонов, издающих звуки различной высоты. Нам не составит труда расположить эти камертоны в порядке возрастания высоты звука. Это отношение упорядочения будет инстинктивным и не поддающимся дальнейшему анализу, поскольку оно будет проистекать из той загадочной способности человека, которая позволяет всем людям утверждать, что один звук более пронзительный, чем другой. Таким образом, человеческое восприятие ответственно за это определение порядка в музыке; и мы вполне можем представить себе людей, чьи реакции на звуковые впечатления могут отличаться от наших и которые, как следствие, расположат диапазоны в совершенно ином линейном порядке. В результате нота, которую мы считаем лежащей «между» двумя данными нотами, по мнению этих других существ, может лежать за их пределами. Однако в любом случае, если мы предположим, что различные ноты отличаются друг от друга по высоте незаметными градациями, будет построено сенсорное континуум звуковых высот, хотя то, что мы называем континуумом высот, для других существ будет представляться как разрыв нот, и наоборот. В любом случае соответствующие сенсорные континуумы были бы одномерными, поскольку при подавлении любой данной ноты непрерывность перехода была бы нарушена. А теперь давайте предположим, что эти странные существа были еще более непохожи на нас, людей. Давайте предположим, что не только каждая нота их континуума казалась бы им неотличимой от непосредственно предшествующей и непосредственно следующей за ней, но и что им было бы невозможно отличить каждую данную ноту от двух дополнительных нот. Это предположение отнюдь не так произвольно, как может показаться, поскольку мы хорошо знаем, что даже нормальные люди испытывают значительные трудности в различении крайней жары и крайнего холода, а также знаем, что люди, страдающие цветовой слепотой, не могут отличить красный цвет от зеленого. Но тогда, возвращаясь к нашей иллюстрации, мы должны понимать, что звуковое континуум, упорядоченное с помощью этого нового понимания близости или смежности, больше не будет одномерным.

Другими словами, в силу этого нового порядка, навязанного особенностями их восприятия, тот же набор нот автоматически расположится в двумерном сенсорном континууме. Именно это мы имеем в виду, когда утверждаем, что совокупность элементов сама по себе не имеет определенной размерности и что некоторый порядок должен быть навязан извне. Поэтому мы должны понимать, что когда мы говорим о пространстве нашего опыта как о трехмерном в точках, это утверждение не может подразумевать какое-либо внутреннее свойство пространства. Только с учетом совокупности наших переживаний, интерпретируемых в свете того сенсорного порядка, который, как представляется, навязывается нашим координирующим способностям, это утверждение может приобрести смысл. Эти выводы ни в коей мере не опровергаются такими фактами, как наша неспособность выбраться из закрытой комнаты или завязать узел в пространстве с четным числом измерений. К сожалению, из-за нехватки времени мы не можем более подробно остановиться на этих сложных вопросах.

[6] Здесь мы снова, из соображений простоты, игнорируем наше осознание усилия фокусировки и сходимости. Если мы примем их во внимание, то, по правде говоря, будем рассматривать не одну частную перспективу, а значительное их количество. Даже в этом случае наши данные будут неполными.

[7] Эта трудность подсчета точек могла бы быть в определенной степени устранена, если бы пространство рассматривалось как дискретное или атомарное; в этом случае мы могли бы подсчитать атомы пространства, разделяющие точки, и тем самым установить абсолютные соотношения между расстояниями. Но и в этом случае процедура была бы искусственной, поскольку она была бы аннулирована, если бы мы не предположили, что пространственные пустоты, разделяющие последовательные атомы, всегда одинаковы по величине; кроме того (как указывает доктор Сильберштейн в своей книге «Теория относительности»), мы оказались бы в затруднительном положении, пытаясь определить, как следует определять последовательность атомов, поскольку это определение зависело бы от определения порядка. В любом случае, нам не нужно беспокоиться об атомных или дискретных многообразиях, поскольку Риман предполагал, что математическое пространство является непрерывным многообразием. С учетом квантовых явлений мы в конечном итоге можем быть вынуждены изменить эти взгляды и приписать пространству дискретную природу, но это неопределенная возможность, обсуждение которой не имеет смысла при нынешнем состоянии наших знаний.

[8] Если бы не это ограничение, сравнение расстояний в пространстве, расположенных в разных местах, никогда не могло бы быть получено путем перемещения стержней из одного места в другое; поскольку измерения, полученные нашими стандартными стержнями по достижении места назначения, зависели бы в основном от маршрута, по которому они следовали, их едва ли можно было бы назвать жесткими. При соблюдении этого ограничения мы получаем наиболее общий тип римановых пространств или геометрий, представленный тремя основными типами: евклидовым, римановым и лобачевским. Вейль, однако, отказывается от постулата Римана и тем самым получает более общий тип пространства или геометрии.

Читатель, не имеющий математического образования, скорее всего, проявит нетерпение по поводу того, что математики отвергают, казалось бы, самоочевидные постулаты. Но следует помнить, что постулат, который можно отвергнуть и чье противоположное утверждение приводит к совершенно последовательной доктрине, конечно же, не может считаться рационально самоочевидным; поэтому в ряде случаев легитимность так называемых самоочевидных утверждений можно обсуждать только *апостериорно*, а не *априорно*. На самом деле, наша вера в самоочевидные утверждения в большинстве случаев проистекает из грубого опыта, и мы не можем исключить возможность того, что более точные наблюдения могут заставить нас радикально изменить свои мнения. Открытие Эйнштейна о том, что параллельный постулат Евклида должен быть отвергнут в мире реальности, является тому наглядным примером.

Что касается чрезвычайно странной геометрии Вейля, то вполне возможно, что она в конечном итоге также окажется отражением реальности, поскольку Вейль обнаружил, что существование электромагнитных явлений в природе можно объяснить, если предположить, что пространство-время относительности имеет более общий вид, описанный Вейлем, а не более ограниченный вид, описанный Эйнштейном.

[9] Однако связь прямой линии с кратчайшим расстоянием между двумя точками сохраняется только при условии, что несколько измерений пространства имеют одинаковую природу. Если мы рассматриваем континуумы, в которых несколько измерений различаются по своей природе, как в пространстве-времени относительности, прямая линия может оказаться самым длинным расстоянием между двумя точками.

[10] В главе, посвященной теории Вейля, мы кратко упомянем метод Вейля.

[11] Мы имеем в виду только те тела, которые дают числовые результаты геометрии Римана или Лобачевского — оба эти типа геометрии совместимы с однородностью пространства.

[12] Кроме того, поведение света при преломлении доказало, что здесь имеет место форма принципа наименьшего действия, известная как принцип минимального времени Ферма.

[13] В этом обсуждении мы всегда предполагаем, что наблюдатель стоит прямо над монетой; поэтому мы не учитываем изменения видимой формы из-за наклонной линии зрения. Последняя проблема имеет совершенно иной характер.

[14] Причина, по которой Риман конкретно упоминает бесконечно малые величины, заключается в том, что он считал доказанным, что для обычных протяженностей эксперименты показали, что пространство является евклидовым, а для чрезвычайно больших протяженностей он не считал возможным проведение измерений.

[15] Этот метрический эфир не следует путать с классическим эфиром оптики и электромагнетизма.

[16] Однако, чтобы быть справедливым по отношению к Эйнштейну, следует отметить, что он, по-видимому, не находился под прямым влиянием Римана.

[17] Факт, который ни в коем случае не является *априорно* очевидным.

[18] Называя n размерность неевклидова пространства, количество измерений порождающего евклидова пространства будет $\frac{n(n+1)}{2}$, а не $n+1$, как на первый взгляд можно было бы подумать.

[19] Эквивалентная форма критики, обсуждаемой в тексте, состоит в том, что, поскольку евклидова геометрия ассоциируется с числом ноль, она должна быть логически предшествующей неевклидовым разновидностям, поскольку они ассоциируются с числами, отличными от нуля. Но и здесь, опять же, только потому, что мы считаем «кривизну» фундаментальной, евклидова геометрия связана с нулем. Если бы мы решили взять «радиус кривизны», евклидова геометрия была бы связана с бесконечностью, а неевклидовы разновидности — с конечными числами. Следовательно, проблема теперь сводилась бы к определению того, что является более фундаментальным: «кривизна» или «радиус кривизны»; и, по сути, «кривизна» является более сложным понятием, чем «радиус кривизны».

С другой стороны, мы могли бы охарактеризовать различные геометрии с помощью параллельной постулаты. В этом случае геометрия Римана была бы связана с числом ноль, евклидова геометрия — с числом один, а геометрия Лобачевского — с бесконечностью. Еще один метод представления заключается в подходе к проблеме через проективную геометрию. Тогда мы обнаружим, что геометрия Лобачевского связана с окружностью, а геометрия Евклида — с пересечением линии в бесконечности с двумя мнимыми линиями, что дает «круговые точки в бесконечности», тогда как геометрия Римана будет связана с окружностью с мнимым радиусом. При таком методе представления ноль никогда не будет фигурировать в наших рассуждениях. И никто не стал бы утверждать, что понятие мнимых точек в бесконечности (круговых точек) логически предшествовало реальному кругу с конечным радиусом. Короче говоря, мы видим, что существует большое количество различных методов представления различных геометрий; и в зависимости от выбранного метода число ноль может быть связано с евклидовой геометрией или с неевклидовой геометрией, или, опять же, ни с той, ни с другой. Все, что мы можем с уверенностью сказать, это то, что евклидова геометрия является самой простой из геометрий, но не обязательно самой фундаментальной.

[20] Следует отметить, что если бы источник света был расположен в центре сферы, а не на северном полюсе, все большие окружности на сфере отбрасывали бы прямые линии теней на касательной плоскости. Тем не менее, тени на плоскости, как и прежде, дали бы геометрию Римана (эллиптического типа). Таким образом, мы снова видим, что абсолютная форма, размер и прямолинейность ускользают от нас в каждом случае, и мы даже не можем сказать, что прямые линии Римана искривлены по отношению к евклидовым. Все, что имеет значение, — это взаимное поведение тел, законы их расположения.

[21] Для полноты картины можно упомянуть, что связность можно изучать с помощью той же процедуры, что и размерность. Так, пространство считалось двумерным, когда можно было перехватить путь непрерывного перемещения между любыми двумя точками, проследив непрерывную линию по всему пространству. Если применить этот тест к поверхности пончика, то окажется, что непрерывная линия, такая как окружность, охватывающая часть пончика, как кольцо, будет недостаточна для разделения пончика на две отдельные части, которые не могут быть соединены путем непрерывного перемещения по поверхности. Это свойство отличает поверхность пончика от поверхности сферы или эллипсоида, и все же поверхность пончика по-прежнему будет двумерной, но ее связность будет отличаться из-за отверстия, проходящего через ее вещество.

[22] Момент времени, конечно, является лишь абстракцией, но таковой же является и математическая точка в пространстве.

[23] Мы имеем в виду не только приливы и отливы в море, но и твердые приливы, возникающие в веществе Земли.

[24] Проблема, конечно, гораздо сложнее, чем может показаться из настоящего анализа. Ведь замедление скорости вращения Земли из-за приливного действия также приведет к отступлению Луны, вызывая тем самым изменение периода ее обращения вокруг Земли.

[25] Это связано с тем, что в эксперименте Майкельсона нет необходимости рассматривать сферу. Два плеча прибора могут иметь разную длину, и все, что наблюдается, — это постоянное совпадение интерференционных полос с отметками на приборе.

$$\cos \theta = \frac{g_{12}}{\sqrt{g_{11}g_{22}}}$$

[26] Точнее говоря

[27] Когда мы рассматриваем g в этом свете, мы понимаем, что выражение для ds^2 можно было бы предсказать напрямую, не обращая внимания на измерения. Мы могли бы, например, попытаться построить чисто математическим способом возможные выражения, содержащие такие переменные, как du и dv , вместе с поправочными коэффициентами, роль которых заключалась бы в обеспечении инвариантности. Риман заметил, что в дополнение к классическому выражению можно построить ряд таких выражений. Но если мы хотим, чтобы наше значение ds^2 было совместимо с существованием теоремы Пифагора, а именно $(ds^2 = du^2 + dv^2$ для прямоугольного треугольника), необходимо придерживаться классического выражения ds^2 . По этой причине тип пространства, получаемый при этих условиях, называется пространством Пифагора; и в дальнейшем у нас не будет повода рассматривать какие-либо другие разновидности.

[28] Вкратце, трудности заключаются в следующем: дифференциальная геометрия предполагает непрерывность; следовательно, в дискретном континууме она утратит свою силу. Но и это еще не все, поскольку существуют различные виды непрерывности, и непрерывность должна быть особого типа, чтобы дифференциальная геометрия оставалась применимой. Например, в предыдущем изложении метода мы предположили, что выражение Δs будет стремиться к определенному пределу ds , когда точки будут располагаться все ближе и ближе друг к другу. В частности, мы предположили, что для бесконечно малых площадей поверхности будет выполняться теорема Пифагора $ds^2 = du^2 + dv^2$. Это было равносильно утверждению, что бесконечно малые площади нашей кривой поверхности можно рассматривать как плоские или евклидовы, а значит, отождествлять с плоскостью, касательной к ним. Поскольку ограничение евклидовой геометрии в бесконечно малых областях является именно тем ограничением, которое Риман наложил на пространство, нам не нужно бояться применять дифференциальный метод к типам неевклидова пространства, обсуждавшимся до сих пор.

Тем не менее, мы можем представить себе пространства, в которых Δs не будет стремиться к пределу, и в которых, каким бы крошечным ни была площадь нашей поверхности, мы все равно будем сталкиваться с волнами внутри волн *до бесконечности*. Ситуация будет схожа с той, которая представлена кривыми, не имеющими касательных в любой точке. Однако такие случаи представляют только теоретический интерес.

[29] Следует отметить, что существует еще один тип кривизны, отличный от гауссовой кривизны. Этот другой тип кривизны называется *средней кривизной* в точке и определяется формулой $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

В этой главе мы упомянули только гауссову кривизну, поскольку, как обнаружил Гаусс, только этот тип кривизны характеризует геометрию поверхности при исследовании с помощью евклидовых измерительных линеек. Это открытие является прямым следствием следующих соображений:

Две поверхности, имеющие одинаковую гауссову кривизну, могут быть наложены друг на друга без разрыва или растяжения, тогда как две поверхности, имеющие разную гауссову кривизну, никогда не могут быть наложены друг на друга, если мы их не разорвем или не растянем. Очевидно, что метрические отношения поверхности не нарушаются, пока мы не растягиваем поверхность; и именно поэтому поверхности, имеющие одинаковую гауссову кривизну и которые, следовательно, могут быть наложены друг на друга без растяжения, должны обязательно иметь одинаковую геометрию.

Несколько иллюстраций могут быть полезны: плоский лист бумаги имеет нулевую гауссову кривизну и нулевую среднюю кривизну в каждой точке. Цилиндр, конус или рулон имеют нулевую гауссову кривизну, но положительную среднюю кривизну. Именно различия в средних кривизнах заставляют нас визуальнo воспринимать эти поверхности как отличные от плоскости. Но благодаря тому, что плоскость, цилиндр, конус и рулон имеют одинаковую нулевую гауссову кривизну, мы можем обернуть плоскость вокруг цилиндра или конуса, не растягивая ее.

По этой причине все эти поверхности имеют одинаковую евклидову геометрию (при использовании евклидовых мерных линеек). С другой стороны, *минимальная поверхность* (такая как поверхность, определяемая мыльной пленкой, натянутой между проволоками, расположенными в разных плоскостях) имеет нулевую кривизну, как и плоскость, но в отличие от плоскости она имеет отрицательную гауссову кривизну; следовательно, ее нельзя наложить на плоскость, и поэтому ее геометрия является неевклидовой.

По той же причине сфера, гауссова кривизна которой является постоянным положительным числом, или седлообразная поверхность, называемая псевдосферой, гауссова кривизна которой является постоянным отрицательным числом, не могут быть выровнены на плоскости без растяжения. В результате их геометрии отличаются от евклидовой геометрии плоскости. Мы видели, что эти геометрии являются соответственно римановой и лобачевской.

[30] Если бы мы хотели представить неевклидову геометрию как результат поведения наших измерительных стержней, изгибающихся при смещении по сравнению с евклидовыми стержнями, мы бы увидели, что евклидовость в бесконечно малом подразумевает, что когда наши стержни имеют бесконечно малую длину и смещаются на бесконечно малые расстояния, они ведут себя так же, как жесткие евклидовые стержни.

[31] Эти инвариантные типы кривизны задаются формулами $\sum G_{ik}G^{ik}$ и $\sum B^{ikst}G_{ikst}$. Если мы рассмотрим термины G^{ik} и B^{ikst} по отдельности, то получим «тензоры». В четырехмерном пространстве существует 10 компонентов для тензора G^{ik} и 20 для тензора B^{ikst} . Эти компоненты представляют кривизны, измеренные в различных направлениях.

[32] Это различие необходимо сделать, поскольку пространство может быть плоским, но при этом только полуевклидовым, как будет понятно в последующих главах при обсуждении пространства-времени.

[33] Компоненты тензора G_{ik} также были компонентами тензора.

[34] Можно отметить, что геометрия, а значит и природа пространства, полностью определяется только тогда, когда мы выражаем ее в терминах тензора Римана-Кристоффеля B_{ikst} . Таким образом, $B_{ikst} = 0$ в каждой точке обозначает идеально плоское или гомотопическое пространство; $G_{ik} = 0$, с другой стороны, включает в себя целую серию в целом неоднородных пространств, из которых $B_{ikst} = 0$ (однородное и гомотопическое разномнообразие) является лишь одним конкретным примером. Следовательно, само по себе $G_{ik} = 0$ не дает нам никакой конкретной информации.

Точно так же идеально однородное сферическое пространство четырех измерений, *т. е.* тип пространства, соответствующий четырехмерной геометрии Римана, задается формулой $B_{ikst} = \frac{\lambda}{3}(g_{ik}g_{st} - g_{is}g_{kt})$, где λ — константа, зависящая от интенсивности кривизны. С другой стороны, $G_{ik} = \lambda g_{ik}$ представляет собой целую серию пространств, как правило, неоднородных, из которых вышеупомянутое действительно сферическое и однородное многообразие является лишь одним из частных случаев.

[35] Цитата из одного из стандартных учебников по философии.

[36] Мы стараемся объяснять вещи как можно проще, но на самом деле наше утверждение о том, что ускорение остается абсолютным в специальной теории Эйнштейна, не совсем верно. Ускорение тела, которое в ньютоновской науке оставалось неизменным независимо от нашего выбора той или иной галилеевой системы отсчета, в специальной теории изменяется в аналогичных условиях. Тем не менее, поскольку между скоростью и ускорением по-прежнему существует четкое различие, мы считаем оправданным из соображений простоты изложить проблему таким образом, как мы это сделали.

[37] С учетом ограничений, упомянутых в примечании в предыдущей главе.

[38] Эту формулу $x = x' + vt$ или $x' = (u + v)t$ можно также записать следующим образом: $x' = (u + v)t$, поскольку $x' = ut$. Мы можем сделать вывод, что скорость мяча относительно насыпи равна его скорости в поезде плюс скорость поезда относительно насыпи. Это выражает классическое убеждение, что скорости складываются как числа.

[39] Однако в классической теории очень точные абберационные наблюдения должны были бы выявить нашу скорость в эфире, но наблюдения такого рода выходят за пределы наших нынешних возможностей; и теория Эйнштейна с тех пор доказала, что какими бы точными ни были наши эксперименты, эта скорость никогда не может быть выявлена.

[40] Хотя никакие экспериментальные результаты не могли подтвердить такое предположение, Максвелл без колебаний включил его в свою теорию. Таким образом, его знаменитые уравнения электромагнетизма представляли собой результаты экспериментов, дополненные этим дополнительным гипотетическим предположением. Целесообразность выдвижения этой гипотезы была подчеркнута, когда выяснилось, что она обеспечивает закон сохранения электричества.

[41] Если два магнитных полюса одинаковой силы, расположенные в пустом пространстве на расстоянии одного сантиметра друг от друга, притягивают или отталкивают друг друга с силой в один дин, то каждый из полюсов представляет собой одну единицу силы магнитного полюса в *электромагнитной системе единиц*. Благодаря взаимосвязи между магнетизмом и электричеством, мы можем вывести из этого единицу электрического заряда также в электромагнитной системе. Аналогично, если два электрических заряда одинаковой силы, также расположенные в пустом пространстве на расстоянии одного сантиметра друг от друга, притягивают или отталкивают друг друга с силой в один дин, то любой из зарядов представляет собой одну единицу электрического заряда в *электростатической системе единиц*. Из этого мы можем вывести единицу силы магнитного полюса в электростатической системе.

[42] Именно этому давлению света обязано отталкивание хвостов комет от Солнца.

[43] Под экспериментом первого порядка мы понимаем эксперимент, достаточно точный, чтобы обнаружить величины порядка $\frac{v}{c}$, где v — скорость Земли в неподвижном эфире, а c — скорость света. Аналогично, под экспериментом второго порядка мы понимаем эксперимент, способный обнаружить величины порядка $\left(\frac{v}{c}\right)^2$. Поскольку $\frac{v}{c}$, безусловно, намного меньше, $\frac{v}{c}$ — чрезвычайно малая величина, а $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ — еще меньше. Таким образом, мы видим, что эксперимент второго порядка обязательно будет гораздо более точным, чем эксперимент первого порядка. Можно также упомянуть, что пока еще не было экспериментов, превосходящих по точности эксперименты второго порядка.

[44] Классические или галилеевы преобразования были $x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t$, где v было скоростью системы отсчета по отношению к системе отсчета, находящейся в покое в эфире, а значит, по отношению к самому эфиру; эта скорость была направлена вдоль оси x , и предполагалось, что обе системы отсчета совпадали в начальный момент времени $t = 0$. При тех же условиях преобразования Лоренца были $x' = \beta(x - vt), y' = y, z' = z, t' = \beta\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$, где $\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ было скоростью света. Легко видеть, что когда v мало по сравнению с c , разница между двумя типами преобразований становится незначительной.

[45] Фактически, название «сокращение Фитцджеральда» также следует отказаться в теории Эйнштейна, поскольку Фитцджеральд и Лоренц всегда рассматривали сокращение в свете реального физического сокращения в неподвижном эфире. Тем не менее, если читатель осознает разницу между двумя концепциями сокращения, то сохранение первоначального названия упростит дело.

[46] Необходимо учитывать оба этих условия. Если, например, мы ограничимся инвариантностью скорости света, не принимая во внимание относительность скорости, то такие преобразования, как $x' = x - vt, t' = t - \frac{vx}{c^2}$, также будут удовлетворять нашим требованиям, но они не будут преобразованиями Лоренца-Эйнштейна и не будут согласовываться с относительностью галилеева движения.

[47] Эти результаты уже были предсказаны Лоренцем, поскольку, как мы видели, он считал, что его преобразования применимы к чисто электромагнитным величинам. Но Лоренц всегда имел дело с неподвижным эфиром и с движением через неподвижный эфир; поэтому интерпретация этих открытий была гораздо менее удовлетворительной.

[48] Мы должны помнить, что только свет в вакууме распространяется со скоростью c , следовательно, обладает инвариантной скоростью. Свет, проходящий через прозрачную среду, движется со скоростью, меньшей, чем c ; следовательно, в этом случае его скорость перестает быть инвариантной и зависит от скорости среды, а также от скорости наблюдателя.

[49] Объективный мир науки не имеет ничего общего с миром вещей самих по себе, о котором говорит метафизик. Этот метафизический мир, если он вообще имеет какой-либо смысл, не имеет отношения к науке.

[50] Идентификация массы с энергией, необходимая в теории Эйнштейна, позволяет нам избежать парадоксального явления, описанного в следующем примере: представьте себе раскаленную сферу, излучающую свет во всех направлениях. Если она находится в состоянии покоя в какой-либо галилеевой системе отсчета, она должна оставаться там в неизменном положении, поскольку давление, оказываемое излучением света, распределяется симметрично вокруг сферы. Но предположим, что теперь мы наблюдаем раскаленную сферу из какой-то другой галилеевой системы отсчета, удаляющейся от первой со скоростью v . Из этой новой системы отсчета раскаленная сфера будет двигаться со скоростью v , тогда как излучаемые ею световые волны по-прежнему будут иметь скорость c во всех направлениях в нашей системе отсчета. Тогда нам будет казаться, что световые волны *ускоряются от сферы* в направлении ее движения со скоростью $c - v$, в то время как они движутся со скоростью $c + v$ в противоположном направлении. Условия давления света больше не будут симметричными, и расчеты показывают, что движение сферы должно постепенно замедляться под действием этого сопротивления. Но это невозможно, поскольку если бы сфера, как нам кажется, замедлялась, она никогда не смогла бы оставаться привязанной к равномерно движущейся галилеевой системе отсчета, и мы столкнулись бы с противоречием. Однако, как только мы признаем, что раскаленная сфера, излучая свет, теряет энергию и, следовательно, массу, принцип сохранения импульса показывает, что эта постепенная потеря массы приведет к увеличению скорости сферы и, таким образом, точно компенсирует потерю скорости, вызванную несимметричным давлением света. Таким образом, парадокс объясняется очень просто.

[51] Дальнейшее подтверждение было получено, когда механизм атома Бора был изучен Зоммерфельдом. В атоме Бора электроны вращаются вокруг центрального ядра по определенным стабильным орбитам. Зоммерфельд, принимая во внимание изменения массы электронов, вызванные их движением, как того требует теория Эйнштейна, доказал, что вместо резких спектральных линий, которые всегда наблюдались, было бы правомерно ожидать, что более точное наблюдение докажет, что эти резкие линии являются пучками очень тонких линий, тесно сгруппированных вместе. Эти предположения были подтверждены экспериментом как качественно, так и количественно.

[52] Всякий раз, когда мы говорим о «другой галилеевой системе отсчета», мы неизменно имеем в виду систему, движущуюся относительно первой. Если бы она не находилась в состоянии относительного движения, она составляла бы ту же самую систему отсчета.

[53] Можно упомянуть, что физическое существование конечной инвариантной скорости ни в коем случае не является невозможным. Это приемлемо с математической точки зрения, и единственный вопрос, который нам предстоит рассмотреть, заключается в том, соответствует ли это физической реальности.

[54] Под внешним событием мы не обязательно подразумеваем событие, происходящее вне нашего тела. Мы имеем в виду событие, которое не сводится к простому осознанию сознанием. Внезапная боль в пальце ноги будет представлять собой внешнее событие в той же мере, что и взрыв бочки с порохом на расстоянии мили.

[55] Относительность одновременности — это наиболее революционная концепция, как видно из следующего примера:

Рассмотрим двух наблюдателей, один из которых находится в поезде, движущемся равномерно по прямой линии, а другой — на набережной. В тот самый момент, когда эти два наблюдателя проходят мимо друг друга в точке P , в точке P возникает вспышка света. Световая волна, произведенная этой мгновенной вспышкой, будет иметь форму расширяющейся сферы. Поскольку неизменная скорость света одинакова для обоих наблюдателей, мы должны предположить, что каждый из них будет находиться в любой момент времени в центре расширяющейся сферы.

Наша первая реакция может быть такой: «Что за ерунда! Как разные люди, путешествующие по разным направлениям, могут все находиться в центре одной и той же сферы?» Однако наше возражение будет необоснованным.

Дело в том, что сферическая поверхность постоянно расширяется, поэтому точки, определяющие ее положение, должны быть определены в один и тот же момент времени; они должны быть определены одновременно. И именно здесь возникает неопределенность. Один и тот же момент времени для всех точек поверхности не имеет одинакового значения для разных наблюдателей; следовательно, каждый наблюдатель на самом деле говорит о разной мгновенной поверхности.

[56] «Принципы естественного знания».

[57] В настоящей главе мы объединяем под общим названием «неореализм» все те метафизические учения, которые сходятся в том, что восприятие, особенно зрительное, является вопросом непосредственного познания. Эта классификация может не совпадать с классификацией метафизиков. Но поскольку с точки зрения науки все учения, придерживающиеся теории непосредственного познания реальности, одинаково несостоятельны, мы не будем утруждать себя их разграничением.

[58] Давая одинаковое название этим двум противоречивым типам одновременности, доктор Уайтхед вскоре становится жертвой своей собственной терминологии. Так, в своей книге «Теория относительности» он сообщает нам, что принимает открытие Эйнштейна об относительности одновременности. Но при этом он, по-видимому, не замечает, что тип одновременности, который Эйнштейн доказал как относительный по отношению к движению, является научным типом и не имеет ничего общего с неореалистическим типом. Последний никогда не является относительным по отношению к движению, а относится исключительно к положению. Таким образом, без каких-либо оснований Уайтхед внезапно распространил на свое собственное понимание одновременности характеристику, которая принадлежит типу, который он критикует. Но из-за того, что двум типам было дано одно и то же название, читатель, не являющийся специалистом в этой области, склонен упускать из виду эту путаницу и таким образом приходит к очень ошибочному пониманию природы открытий Эйнштейна.

[59] К сожалению, большинство взглядов доктора Уайтхеда сформулированы настолько расплывчато и неясно, что их обычно можно интерпретировать по-разному. Как он сам откровенно признает в своей книге «Принципы естественного знания»: «Вся часть II, *то есть* главы V–VII, страдает от нечеткости выражений из-за того, что смысл моих идей не сформировался в моем сознании с достаточной четкостью».

Очевидно, что если автор книги не совсем ясно выражает свои мысли, то всегда существует опасность, что кто-то решит этот вопрос за него. Соответственно, мы бы опустили любые ссылки на труды доктора Уайтхеда, если бы не то, что некоторые из его критических замечаний (хотя, по нашему мнению, они совершенно ошибочны) часто представляют значительный интерес, поскольку ведут к новому взгляду на вещи. В любом случае, при дальнейших упоминаниях Уайтхеда мы будем рассматривать его критические замечания в свете типовых возражений, независимо от того, отражают ли они, по нашему мнению, его личные взгляды.

[60] Курсив наш.

[61] На данный момент мы ограничиваемся рассмотрением галилеевых систем отсчета; проблема становится весьма сложной, когда мы изучаем особенности, возникающие при выборе ускоренных систем отсчета. В последнем случае неевклидовость, или кривизна пространства, появляется при наличии ускорения (а также гравитации), так что мы не можем даже говорить о множественности наложенных друг на друга евклидовых пространств. Кроме того, пространство и время становятся настолько безнадежно запутанными, что мы вынуждены выражать себя в терминах четырехмерного пространства-времени, где все снова становится ясным.

[62] Конформные преобразования — это преобразования, которые изменяют форму линий, оставляя неизменными значения их углов пересечения. Они широко используются в картах, *например*, в проекции Меркатора или в стереографической проекции.

$$dx' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (dx - vdt); \quad dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(dt - \frac{vdx}{c^2} \right)$$

[63]

направление движения располагается вдоль оси Ox .

[64] Этот тип геометрии иногда называют *плоской гиперболической*, но поскольку название «гиперболическая» также относится к геометрии Лобачевского, оно может ввести в заблуждение. Поэтому предпочтительнее использовать выражение «полуевклидова».

[65] Минковский продемонстрировал значимость выражения для ds^2 , взяв новую переменную $T = ict$, где i обозначает

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + dT^2,$$

$\sqrt{-1}$. С этим изменением ds^2 можно записать следующим образом:

что является выражением квадрата расстояния в четырехмерном евклидовом пространстве при использовании декартовой системы координат. Поскольку это выражение остается неизменным по значению и форме во всех галилеевых системах отсчета, мы должны сделать вывод, что в пространственно-временном представлении переход от одной галилеевой системы отсчета к другой задается вращением нашей четырехмерной декартовой пространственно-временной сетки. Теперь вращение представляет собой изменение системы координат в той же степени, что и деформация системы координат, и все изменения такого рода влекут за собой изменение координат точек континуума. Другими словами, они соответствуют математическим преобразованиям. Преобразования, сопровождающие вращение декартовой системы координат, имеют особенно простую природу; они называются «ортогональными преобразованиями». Из этого следует, что если мы запишем ортогональные преобразования для четырехмерного евклидова пространства-времени Минковского, то мы получим *ipso facto* знаменитые преобразования Лоренца-Эйнштейна, которые представляют переход от одной галилеевой системы к другой. Этот факт легко проверить. Если теперь вспомнить, что Минковский избавился от знака минус в выражении для ds^2 , написав T вместо ict , мы получим следующий результат: две галилеевы системы, движущиеся с относительной скоростью v , представлены двумя декартовыми системами координат пространства-времени, различающимися по ориентации на мнимый угол θ , где θ связано с v формулой $\tan \theta = \frac{iv}{c}$.

[66] Общее выражение, дающее состав скоростей во всех трех случаях, можно понять следующим образом: если мяч движется по поезду со скоростью v , измеренной в поезде, и если поезд движется со скоростью u в том же направлении вдоль насыпи, то скорость мяча относительно насыпи определяется формулой V , где V имеет следующее выражение:

$$V = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}$$

В этой формуле C представляет собой значение инвариантной скорости в том конкретном типе мира, который мы рассматриваем.

В классической науке C бесконечно, и формула вырождается в $V = u + v$. Это хорошо известная классическая композиция, в которой скорости, лежащие в одном направлении, складываются алгебраически.

В теории Эйнштейна C равна постоянной Максвелла c . Поскольку это реальное конечное число, мы получаем состав типа Лобачевского. Если бы C было мнимым числом, мы получили бы состав типа Римана.

Можно отметить, что если для u или v подставить C , то есть, если мы хотим узнать, что получится в результате сложения скорости к инвариантной скорости, мы получим

$$V = \frac{C + u}{1 + \frac{Cu}{C^2}} = C \frac{C + u}{C + u} = C.$$

Это доказывает, что при сложении скорости к инвариантной скорости мы по-прежнему получаем инвариантную скорость, что оправдывает максимальный и инвариантный характер, приписываемый C .

[67] «Принцип относительности».

[68] Можно упомянуть, что логики часто пытались ввести определения такого рода в математику, но в математике, как и в физике, их попытки всегда осуждались. Например, определение индуктивного числа, также данное доктором Уайтхедом, было подвергнуто резкой критике Пуанкаре (в «Наука и метод»), который заметил, что цель определения заключается в том, чтобы определить, а определение Уайтхеда, будучи циклическим, ничего не определяет.

[69] В случае Френеля его незнание неевклидовой геометрии можно было бы считать ослабляющим силу аргумента, но это утверждение не было бы верно в отношении Лоренца или теоретических физиков второй половины XIX века.

[70] Важно понимать точное значение принципа энтропии. Учитывая тот факт, что этот принцип относится к вероятностям, а не к абсолютной определенности, мы можем выразить его общую формулировку следующим образом: для всех изменений системы общая энтропия либо увеличивается (необратимые изменения), либо остается постоянной (обратимые изменения). На первый взгляд может показаться, что преобразование тепла в работу в паровом двигателе или отвод тепла от более холодного тела и его передача более теплому, как в случае с холодильными машинами, являются явным нарушением этого принципа. Но на самом деле это не так. В паровом двигателе неестественное изменение, проявляющееся в преобразовании тепла в работу, уравнивается естественным изменением, иллюстрируемым падением температуры от генератора к конденсатору. В конечном итоге, общая энтропия остается постоянной (в идеально обратимом цикле, например, в цикле Карно) или увеличивается. Опять же, в холодильной машине неестественный переход тепла от холодного к более теплому телу компенсируется естественным преобразованием; это представляет собой преобразование в тепло механической работы, выполняемой на аппарате. Таким образом, снова общая энтропия увеличивается или, в лучшем случае, остается постоянной. Еще более поразительные случаи, когда этот принцип, казалось бы, не работает, иллюстрируются эндотермическими реакциями в химии. Вопреки тому, чего мы могли бы ожидать, они поглощают тепло, так что низкосортная тепловая энергия преобразуется в высокосортную химическую энергию; но и здесь снова действуют компенсирующие факторы. Мы не можем более подробно останавливаться на этих моментах. Читатель, заинтересованный в их изучении, должен обратиться к какому-либо стандартному труду по термодинамике.

[71] Однако это уменьшение угла зрения под влиянием относительного движения будет иметь место только в том случае, если наблюдатель движется в направлении, параллельном направлению полюса, или, по крайней мере, с компонентой, параллельной этому направлению.

[72] Мы не хотим повторяться бесконечно, но должны еще раз отметить, что под абсолютной длиной в классической науке мы имеем в виду исключительно длину, определенную нормами практической конгруэнтности. Мы не подразумеваем абсолютную метафизическую пространственную длину, которая не имеет смысла в науке.

[73] Световой год — это астрономическая единица длины, определяемая расстоянием, которое проходит волна света за один год.

[74] Мы рассматриваем только плоское пространство-время, удаленное от материи.

[75] Недавние эксперименты, проведенные Кеннеди, показали, что выводы Миллера были ошибочными и что нулевой результат первоначального эксперимента был полностью подтвержден. (См. *Proc. Nat. Acad. of Sci.*, ноябрь 1926 г.)

[76] Можно утверждать, что вращающийся диск является ускоренным телом и что, несмотря на это, на него не действует никакая сила. Однако такая точка зрения была бы неверной. Между различными молекулами диска действуют силы сцепления, и если бы не существование этих сил, различные молекулы разлетелись бы по тангентам и совершали бы галилеево движение; диск перестал бы существовать. Именно наличие сил сцепления заставляет молекулы описывать круги, то есть совершать ускоренное или негалилеево движение.

[77] Это полностью соответствовало принципу энтропии.

[78] Есть случаи, когда невозможно найти определенное значение потенциала.

[79] Обратите внимание, как теория относительности устанавливает слияние математического (*т. е.* распределения Эйлера-Монтеро ($\mathcal{G}_{ik}$)) с физическим (*т. е.* силами инерции).

[80] Утверждение, что все тела падают с одинаковым движением в вакууме, является правильным, но, если его неправильно понять, может привести к ошибочным выводам.

Это утверждение означает, что любое тело, независимо от его состава или массы, будет падать точно так же *в заданном гравитационном поле*. Однако, если падающее тело вызывает изменение в распределении поля, то очевидно, что различные падающие тела больше не будут находиться в одном и том же гравитационном поле, и нет оснований утверждать, что все они будут падать точно так же. Например, если относительно небольшая масса — скажем, бильярдный шар — и относительно большая масса — скажем, Луна — будут последовательно освобождены из какой-то очень удаленной точки и оставлены падать к Земле, то, несомненно, будет верно утверждать, что продолжительность падения бильярдного шара будет больше, чем Луны. Легко понять, почему возникает это несоответствие. В обоих случаях из-за взаимного гравитационного воздействия Земля также будет двигаться по направлению к падающему телу (Луне или бильярдной шарике), так что точка столкновения будет находиться в некоторой промежуточной точке, а именно в центре тяжести системы Земля-Луна или Земля-бильярдная шарика. Но в случае с бильярдным шаром, благодаря его относительно незначительной массе, этот центр тяжести, или точка столкновения, будет практически совпадать с центром Земли. Это означает, что Земля практически не будет двигаться по направлению к бильярдной шару, в то время как по отношению к Луне она будет двигаться на значительное расстояние. Таким образом, движение Земли значительно сократило бы расстояние, на которое должна была бы упасть Луна, в то время как бильярдный шар должен был бы упасть на все расстояние.

Если мы хотим изменить условия задачи таким образом, чтобы восстановить полное совпадение скоростей падения Луны и бильярдного шара, мы должны организовать все так, чтобы Земля не могла падать в направлении притягиваемого ею тела. Если бы, например, было возможно прибить Землю к галилеевой системе отсчета, в которой Земля, Луна и бильярдный шар изначально находились в покое, и если бы эту галилееву систему отсчета можно было бы заставить оставаться галилеевой, *т. е.* без ускорения, то предыдущий эксперимент, сначала проведенный с Луной, а затем с бильярдным шаром (при полном удалении Луны), показал бы точно одинаковую скорость падения для обоих тел. Ведь в данный момент изменения в пройденном расстоянии и в характере поля, вызванные смещением Земли, были бы отсутствующими.

Еще один случай, представляющий теоретический интерес в дискуссиях Эйнштейна, связан с так называемым однородным полем, то есть полем, в котором сила тяжести одинакова по интенсивности и направлению во всем пространстве. Поле такого рода будет генерироваться бесконечно протяженным слоем материи равномерной плотности. Благодаря бесконечной массе, которой обладал бы такой слой, его ускорение по отношению к падающему телу было бы равно нулю; все тела падали бы с одинаковым постоянным ускорением по отношению к слою. Равномерные поля представляют теоретический интерес, поскольку поле силы, генерируемое в замкнутом пространстве, движущемся с постоянным ускорением, является именно такого типа. Поэтому, когда Эйнштейн отождествляет поле силы, действующее в ускоряющемся замкнутом пространстве, с гравитационным полем, мы должны помнить, что для создания такого же поля необходимо распределение материи, соответствующее бесконечно протяженному слою. Только в первом приближении можно считать, что конечная масса материи, такая как Земля, создает поле такого рода.

[\[81\]](#) С учетом некоторых тонкостей, о которых будет сказано ниже.

[\[82\]](#) Чтобы избежать путаницы с электромагнитными силами, мы рассматриваем только силы, действующие на незаряженные тела.

[\[83\]](#) Здесь читатель вполне может усомниться в нашем праве утверждать, что скорости комбинируются классическим образом, когда все значение специальной теории относительности заключается в отрицании действительности классических преобразований. На самом деле это возражение было бы правомерным, и, строго говоря, преобразования Эйнштейна-Лоренца должны применяться к каждой последующей мгновенной скорости камеры. Но так сложилось, что при применении преобразований Эйнштейна-Лоренца к поперечному лучу света оказывается, что при низких скоростях камеры изгиб практически такой же, каким он был бы, если бы мы следовали классическому правилу сложения. Другими словами, если бы движение камеры было равномерным, поперечный луч света, измеренный в камере, был бы наклонен примерно так же, как и в классической науке. Действительно, если бы преобразования относительности не влекли за собой изменение наклона поперечного луча света, теория была бы несовместима с хорошо известным явлением астрономической абберации.

[84] Мы предполагаем, что поле не изменяется со временем. Если это не так, мы должны указать, что наши наблюдения также должны проводиться в течение очень короткого промежутка времени.

[85] По крайней мере, качественно. Точное количественное обоснование будет представлено позднее.

[86] Если рассматриваемая нами пространственная сетка является системой прямых линий, например декартова, то утверждение в тексте является точным, но если мы рассматриваем более общий случай криволинейной сетки, мы должны ввести определенные ограничения. В последнем случае наш стержень должен иметь бесконечно малую длину, поскольку при конечной длине его ориентация по отношению к криволинейной системе сеток будет меняться от места к месту. Это приведет к осложнениям. Поэтому предпочтительнее ограничить наше внимание стержнями бесконечно малой длины и рассматривать ориентацию, определенную в одной точке. С учетом этого ограничения в объяснении, приведенном в тексте, ничего менять не нужно.

[87] Таким образом, называя X, Y, Z компонентами вектора в первой системе отсчета, а X', Y', Z' во второй, компоненты

$$X' = aX + bY + cZ, Y' = dX + eY + fZ, Z' = gX + hY + iZ$$

X', Y', Z' будут связаны с компонентами X, Y, Z следующим образом:

где a, b, c, d и т. д. определяются характером изменения, которому подверглась наша система координат.

[88] Не путать с тензором кватерниона.

[89] Разумеется, такое различие не применимо к равенству двух инвариантов, поскольку, как мы видели, изменение системы координат не может повлиять на значение инварианта, поскольку инвариант не имеет компонент.

[90] Тензор g_{ik} является дважды ковариантным, а вектор dx_i , повторяющийся дважды в формуле, является контравариантным.

[91] Обычно скаляры обозначаются обычными буквами, а тензоры первого, второго, третьего и т. д. порядков обозначаются буквами, за которыми следуют индексы, равные по числу порядку тензора. Таким образом, g_{ik} является тензором второго порядка, α_{ikl} — третьего порядка и т. д.

Когда мы подставляем вместо этих индексов все возможные комбинации чисел от 1 до n , где n представляет собой n измерения нашего континуума, мы получаем различные компоненты наших тензоров.

Таким образом, в двумерном пространстве различные компоненты g_{ik} являются $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$, которые сводятся к g_{11}, g_{12}, g_{22} , благодаря тождеству g_{12} и g_{21} , поскольку тензор g_{ik} является симметричным.

Чтобы с первого взгляда отличить контравариантные тензоры от ковариантных, индексы помещаются над буквой. Например, G^{ik} является контравариантной формой G_{ik} , а G^i_k — смешанной формой. Таким образом, мы видим, что $ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k$ на самом деле следует записывать как $\sum g_{ik} dx^i dx^k$, поскольку dx^i относится к контравариантному вектору.

[92] Существуют типы полей, для которых распределение потенциала неопределенно, но нам не нужно рассматривать этот случай, поскольку гравитационное поле Ньютона относится к типу, который допускает определенное распределение потенциала.

[93] В четырехмерном пространстве-времени в каждой точке имеется шестнадцать таких g_{ik} , но, поскольку тензор симметричен, шесть из них оказываются простыми повторениями, поэтому нам нужно говорить только о десяти отдельных g_{ik} в каждой точке.

[94] Точнее, Φ не является g_{44} , но связано с g_{44} соотношением $g_{44} = 1 + \frac{2\Phi}{c^2}$

[95] Позже мы увидим, что это убеждение классической науки не является строго правильным, но все же остается верным при определенных особых обстоятельствах.

[96] Фактически, именно когда Эйнштейн применил принцип действия (который будет обсуждаться ниже), он впервые осознал ошибку в своем первоначальном законе. Также можно отметить, что закон кривизны $G_{ik} = 0$, когда он не сводится к $B_{ikst} = 0$, представляет собой неоднородный тип кривизны, а уж точно не однородную сферическую кривизну, как утверждают некоторые авторы-дилетанты, делая поспешные философские выводы из этого.

[97] Мы увидим (Приложение I), что геодезические линии пространства-времени имеют две основные разновидности: так называемые временные и так называемые пространственные геодезические линии. Переход между ними осуществляется *нулевыми линиями* или минимальными геодезическими линиями; они соответствуют траекториям и движениям лучей света. Пространственные геодезические линии соответствовали бы траекториям и движениям тел, движущихся со скоростью, превышающей скорость света. Поскольку такие движения не могут существовать, согласно теории относительности, мы видим, что свободные тела могут следовать только временным геодезическим линиям. Поэтому в дальнейшем, говоря о геодезических линиях пространства-времени, мы всегда будем иметь в виду временные геодезические линии. Также можно отметить, что в то время как временная геодезическая линия определяет наибольшее пространственно-временное расстояние между двумя точками, нулевая линия или минимальная геодезическая линия всегда имеет нулевую пространственно-временную длину.

[98] Также константы, такие как λ , могут входить в закон кривизны в пустом пространстве вокруг материи, но никогда — посторонние тензоры.

[99] Однако следует помнить, что все рассмотренные нами законы являются подобием законов Ньютона в том смысле, что они не содержат производных потенциалов более высокого порядка, чем второй. Если это ограничение опустить, то становится возможным ряд альтернативных законов. Поскольку их изучение сопряжено с огромными математическими трудностями, они не исследовались, и трудно сказать, какова может быть природа их решений.

[100] Существуют также другие временные потенциалы, *т. е.* g_{14} , g_{24} , g_{34} . Но поскольку в нашей системе координат направление времени перпендикулярно направлениям пространства, эти потенциалы в данном случае исчезают, и мы получаем g_{44} .

$$g_{44} = 1 + \frac{2\Phi}{c^2}.$$

[101] В действительности идентификация немного сложнее; она задается формулой

Кроме того, можно видеть, что этот потенциал g_{44} , значение которого меняется от места к месту, связан с переменной скоростью света от места к месту через гравитационное поле. Точнее, скорость света *в вакууме* задается формулой $c\sqrt{g_{44}}$, которая приблизительно равна $c + \frac{\Phi}{c}$ или $c\left(1 - \frac{m}{r}\right)$, где m — масса тела, возбуждающего гравитационное поле.

[102] Эффект Эйнштейна обусловлен реальным снижением частоты колебаний атома, расположенного ближе к Солнцу, и это замедление вызвано увеличением отклонения потенциала от единицы g_{44} , который стремится к нулю по мере приближения к Солнцу. Было бы совершенно неправильно приписывать это замедлению движения луча света, удаляющегося от Солнца в радиальном направлении, из-за тормозящего действия гравитационного притяжения Солнца. Гравитационное притяжение не имеет ничего общего с эффектом Эйнштейна; и на самом деле, расчеты показывают, что луч света, удаляющийся от солнца, будет постепенно *увеличивать* свою скорость, пока не достигнет своей неизменной скорости c в бесконечности, как если бы он отталкивался, а не притягивался солнцем. Но помимо этих результатов расчетов, сразу видно, что изменение скорости света не может объяснить существование эффекта Эйнштейна. Во всех случаях мы обязательно получаем последовательные колебания с той же частотой, с которой они излучаются атомом; иначе произошло бы постепенное накопление или истощение световых волн, распространяющихся на фиксированном расстоянии, отделяющем нас от атома. Следовательно, любая проверка эффекта Эйнштейна может быть отнесена только к реальному изменению частоты колебаний атома.

[103] Сдвиг Эйнштейна в спектральных линиях, наблюдаемый определенным наблюдателем, будет увеличиваться по мере приближения атома к звезде или увеличения массы звезды. Поэтому для звезды с заданной массой эффект будет увеличиваться по мере уменьшения объема звезды и, следовательно, по мере увеличения ее плотности. Таким образом, мы понимаем, почему для двух звезд одинаковой массы лучшие условия наблюдения будут обеспечены звездой с большей плотностью, а для двух звезд одинаковой плотности — звездой с большей массой.

[104] Согласно специальному принципу относительности.

[105] Конечно, даже с математической точки зрения такая попытка была бы невозможна с самого начала. См. [Приложение IV](#).

[106] Вселенная де Ситтера является действительно сферической только в *том случае*, если мы рассуждаем в терминах мнимого времени. В этом случае для любого наблюдателя и время, и пространство замыкаются на себе. Однако, когда мы используем реальное время t , как и должно быть, мы обнаруживаем, что вселенная де Ситтера дает трехмерное сферическое расширение Римана для пространства данного наблюдателя, но реальное время больше не замыкается на себе. Эта вселенная может быть представлена на поверхности однолистного гиперboloида, открытого с обоих концов в направлении времени, и нет опасений, что время вернется назад, а прошлое станет будущим. Легко понять, почему время отличается по своей кривизне от пространства во вселенной де Ситтера. Достаточно заметить, что в $G_{ik} = -\frac{\lambda}{2}g_{ik}$, поскольку три пространственных g_{ik} (g_{11} , g_{22} , g_{33}) всегда положительны, а g_{44} , временное g_{ik} , всегда отрицательно, или наоборот (за исключением случаев, когда все они исчезают), мы всегда имеем разницу в знаках между кривизнами G_{11}

G_{22}, G_{33} , с одной стороны, и G_{44} , с другой. Если бы мы обратились к мнимому времени, g_{44} также было бы положительным, так что G_{44} имело бы тот же знак, что и другие G_{ik} . Аналогично, в специальной теории, подставляя его вместо dt , мы получили $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + dt^2$ вместо $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - dt^2$, что дало нам $g_{11} = g_{22} = g_{33} = g_{44} = +1$ вместо $g_{11} = g_{22} = g_{33} = +1; g_{44} = -1$.

[107] Здесь мы рассматриваем вселенную де Ситтера как сферическую вселенную для простоты. Другими словами, мы рассуждаем в терминах мнимого времени.

[108] Причину, по которой согласно закону Ньютона равномерное распределение материи до бесконечности невозможно, можно понять следующим образом: Разница между значениями ньютоновского потенциала Φ в двух точках A и B равна работе, которая должна быть затрачена против силы тяжести, чтобы переместить единицу массы из A в B . Но если бы материя была равномерно распределена до бесконечности, никакой работы не потребовалось бы, поскольку где бы ни находилось тело, оно было бы в центре бесконечной вселенной и, следовательно, подвергалось бы равным силам во всех направлениях. Но тогда Φ имело бы одинаковое постоянное значение везде. Это привело бы к исчезновению $\Delta\Phi$. И тогда уравнение Пуассона $\Delta\Phi = 4\pi k\mu$ превратилось бы в $\Phi = 4\pi k\mu$; что невозможно, поскольку μ , плотность материи, должна иметь ненулевое значение. Короче говоря, необходимо было бы изменить закон гравитации и рассмотреть, например, $\Delta\Phi = \lambda\Phi = 4\pi k\mu$ (где λ — некоторая константа) вместо уравнения Пуассона. С этим последним законом вместо закона Ньютона была бы возможна бесконечно протяженная вселенная материи.

[109] Разница в ньютоновском потенциале между двумя точками A и B определяется как работа, необходимая для перемещения единицы массы из A в B против действия ньютоновского гравитационного поля. В этом случае потенциал в B всегда выше, чем в A .

[110] В любом случае, от него можно отклоняться только на мгновение. Более точная формулировка закона равномерного распределения заключалась бы в том, что при достижении состояния статистического равновесия общая энергия системы будет распределена между различными степенями свободы составляющих ее частиц. Однако это равномерное распределение энергии не будет абсолютно строгим. В любой момент времени энергии отдельных степеней свободы будут в некоторых случаях больше, а в некоторых — меньше, чем того требует строгое равномерное распределение, но в среднем равномерное распределение будет сохраняться при рассмотрении больших чисел. Эти выводы являются необходимыми следствиями закона энтропии и основаны на соображениях вероятности. Поскольку в примере с бильярдными шарами мы предположили, что они идентичны, закон равномерного распределения означал, что кинетическая энергия, а значит и скорость шаров, в конечном итоге будет колебаться вокруг средней скорости, соответствующей строгому равномерному распределению; так что, в общем, скорости всех шаров будут одинаковыми. Точные колебания скоростей выражаются законом Максвелла о распределении скоростей и могут быть представлены колоколообразной кривой Гаусса, известной математической кривой, которая входит в закон ошибок и в ряд вероятностных задач.

[111] Здесь отметим разницу между нашей нынешней проблемой и той, которую мы обсуждали при исследовании кривизны пространства внутри жидкой сферы в соответствии со старым законом кривизны пространства-времени. В данном случае, присоединив член λ , космическая материя может заполнить все пространство Вселенной, так что пространство замыкается вокруг себя, если предположить, что материя распределена однородно и непрерывно. Вселенная становится самодостаточной, и ни материя, ни свет не могут из нее выйти.

[112] Мы, конечно, имеем в виду исключительно поверхность сферы, а не центр ее объема, который находится за пределами рассматриваемой нами двумерной поверхности или пространства.

[113] Проблема могла бы стоять иначе, если бы пространство-время рассматривалось как атомарное; ведь, как мы уже упоминали, в дискретном многообразии, в отличие от непрерывного, метрика может быть имманентной в континууме даже при полном отсутствии материи (). Всегда существует вероятность того, что мы находимся на неправильном пути, когда предполагаем, что пространство-время является непрерывным, и нельзя отрицать, что существование квантовых явлений придает весомость этой вероятности. Однако до тех пор, пока мы предполагаем непрерывность фундаментального расширения, вселенная де Ситтера, существующая с совершенно определенной метрикой независимо от наличия материи, кажется крайне маловероятной.

[114] По крайней мере, это кажется единственным типом вселенной, который также согласуется с существованием низких скоростей звезд.

[115] Ситуация будет в некоторой степени схожа с той, которая существует в случае электрических и магнитных воздействий. Здесь мы также знаем, что электрон в состоянии покоя развивает чисто электрическое притяжение в соответствии с законом Ньютона, тогда как при относительном движении к нему добавляется магнитное притяжение под прямым углом к линии движения и электрическому притяжению.

[116] Очень важно отметить, что относительность всех движений, выраженная общим принципом относительности, стоит на совершенно иной основе, чем ультрарелятивистская концепция вращения, отстаиваемая Махом. Эти две формы относительности так часто путают, что представляется необходимым указать на их существенные различия. Общий принцип относительности просто утверждает, что законы природы могут быть выражены в форме, которая остается ковариантной для всех выборов системы координат. Другими словами, все наблюдатели, будь то галилеевы, ускоренные или вращающиеся, будут наблюдать законы природы в одной и той же тензорной форме; поэтому нет никаких оснований следовать классической науке и ставить один тип наблюдателя выше другого. Именно это Эйнштейн изначально имел в виду под относительностью всех видов движения. Таким образом, общий принцип относительности ни в коей мере не подразумевает, что наблюдатель не осознает, что условия изменились после того, как система отсчета, к которой он привязан, была поставлена во вращение.

[117] Увеличение массы в гравитационном поле можно предсказать наиболее простым образом следующим образом: рассмотрим диск, вращающийся в галилеевой системе отсчета. По отношению к этой системе отсчета точки обода будут двигаться с определенной скоростью; следовательно, масса, закрепленная на ободе, увеличится, если ее значение будет вычислено в галилеевой системе отсчета. Но постулат эквивалентности позволяет нам утверждать, что условия были бы точно такими же, если бы диск находился в покое в соответствующем гравитационном поле. Поскольку в этом случае гравитационная сила будет тянуть наружу от центра к краю, как если бы массивное тело было помещено за пределами края, мы можем сделать вывод, что масса тела увеличивается по мере приближения к гравитационным массам. Например, инерционная масса бильярдного шара увеличилась бы, если бы шар был помещен ближе к Солнцу.

[118] До своего открытия цилиндрической вселенной Эйнштейн предпринял несколько попыток объяснить самодостаточную ядерную вселенную в бесконечном пространстве-времени, в которой также была бы удовлетворена относительность инерции. Решение этой проблемы было тесно связано с инвариантностью граничных условий, что отчасти объясняет многочисленные упоминания граничных условий, которые мы встречаем во всех оригинальных работах. Однако низкие скорости звезд доказали, что относительность инерции не может быть реализована в бесконечном пространстве-времени.

[119] Оригинальный закон Эйнштейна в случае слабых гравитирующих масс и низких скоростей практически идентичен закону Ньютона.

[120] Интересно отметить, что в альтернативной представлении цилиндрической вселенной Эйнштейн вообще не использует термин « λ ». Он ограничивается изучением условий, при которых облако космической пыли может привести к цилиндрической форме вселенной и, следовательно, к ее стабильности. Новизна этого подхода заключается в учете определенного давления (не гидростатического), которое физики обсуждают, но которое до сих пор остается необъясненным. Мы имеем в виду внутреннее давление, которое предотвращает взрыв электрона под действием взаимного отталкивания его различных частей, все из которых заряжены отрицательным электричеством. Это давление было названо давлением Пуанкаре; считается, что оно ответственно за атомарность, но его природа весьма загадочна. В рамках этого нового подхода к решению проблемы загадочное когезионное давление P заменяет давление λ в наших прежних уравнениях. Затем Эйнштейн показывает, как и раньше, что для того, чтобы Вселенная была цилиндрической, а значит стабильной, должна существовать связь между этим загадочным давлением P и средней плотностью материи во всей Вселенной, а значит, также между давлением и вселенской кривизной. По крайней мере, в этом отношении, кажется, был достигнут небольшой прогресс в нашем понимании связующего давления материи (см. главу XXXVI). Кроме того, связь между плотностью материи μ и внутренним давлением P легче понять, чем связь между μ и кривизной λ Вселенной; хотя, конечно, λ и P являются одним и тем же, так что, как и раньше, именно материя создает пространственно-временную Вселенную.

[121] Мы предполагаем, что четырехмерное векторное исчисление существовало бы, но это чисто математический вопрос.

[122] Мы используем слово «действие» для обозначения того, что Гамильтон называл «главной функцией». Для более строгого рассмотрения читатель должен обратиться к стандартным работам по аналитической динамике.

[123] Также называется лагранжевой функцией.

[124] Этому обожествлению принципа действия, которое можно проследить до влияния Гильберта и Вейля, противостоят Эддингтон и Сильберштейн, которые указывают, что этот принцип имеет лишь формальное значение.

[125] Мы стараемся объяснить проблему как можно более элементарно. Однако строгое изложение заставило бы нас заявить, что только определенная часть G составляет функцию действия. В любом случае, поскольку лишняя часть G исчезает, когда мы вычисляем стационарное состояние, в нашем изложении не нужно вносить существенных изменений.

[126] «Пространство, время и материя».

[127] Мы не можем настаивать на многочисленных тонкостях, таких как различие между тензорами и тензорными плотностями и т. д. Однако можно отметить, что в то время как внутренние величины ${}^*B_{ikst}$, ${}^*G_{ik}$, ${}^*G^2\sqrt{g}$ отличаются от тензоров B_{ikst} , G_{ik} и от инвариантной плотности $G^2\sqrt{g}$, тем не менее F_{ik} , тензор электрических и магнитных сил, является таким же, как и в теории Эйнштейна. Это связано с тем, что F_{ik} в теории Эйнштейна уже был внутренним тензором.

[128] Эддингтон показал, что расхождения, которые, как можно было бы ожидать, возникнут, по всей вероятности, будут слишком малы, чтобы их можно было наблюдать.

[129] См. примечание на [стр. 354](#).

[130] При выборе подходящих единиц измерения.

[131] Дж. С. Маккензи.

[132] В случае Пуассона этот аргумент имел определенный вес, поскольку были основания полагать, что если бы взгляды Френеля были оправданы, мы в той или иной степени должны были бы наблюдать яркие тени в ходе нашей повседневной жизни.

[133] Едва ли нужно добавлять, что наше осознание ощущений не предполагает никакого знания о пространстве или о нашем человеческом теле как объекте, расположенном в пространстве. Когда, например, младенец, который начинает обретать сознание, чувствует боль в ноге, а затем в руке, не предполагается, что ему удастся локализовать эти два ощущения в двух соответствующих конечностях. Только гораздо позже ему удастся локализовать свои ощущения. На данный момент мы предполагаем, что младенец ничего не знает ни о пространстве, ни о своем теле; он просто регистрирует ощущения, и боль в ноге будет казаться ему отличающейся от боли в руке каким-то неясным качественным образом.

[134] В последнее время Шредингер добился значительного прогресса в интерпретации квантовых явлений внутри атома с помощью волновой теории материи, известной как волновой механике.

[135] Под реализмом мы подразумеваем «реализм здравого смысла», а не то чудовищное искажение, известное как «неореализм».

[136] В последние годы некоторые философы, известные как логики, в частности Бертран Рассел в Англии, Кутура во Франции и другие, подчеркивали логический аспект математики. Вопрос в том, не переоценили ли они его. То, что математическое мышление подразумевает ясное мышление и соответствует правилам логики, никогда не отрицалось; тем не менее утверждение, что все математические рассуждения носят чисто дедуктивный характер и сводятся к правилам логики, является мнением, которое отнюдь не является единодушным. Некоторые из величайших современных математиков, в частности Пуанкаре и Клейн, энергично протестовали против этой точки зрения и указали на многочисленные случаи цикличности в аргументах и недостаток строгости в определениях, представленных логиками. Помимо этого аспекта вопроса, они утверждали, что правила игры не являются всем в ее структуре. Сказать, что математика и логика — это одно и то же, все равно что утверждать, что поэзия — это не что иное, как грамматика, синтаксис и правила стихосложения, или что музыка — это не что иное, как контрапункт и гармония. Вполне возможно,

что мы можем приобрести столь же глубокие знания в области контрапункта и гармонии, какими обладал Бетховен, и все же быть неспособными сочинить произведение, которое могло бы соперничать с любой из его симфоний. Мы должны без колебаний признать, что Бетховен, очевидно, был наделен какой-то таинственной способностью, которой мы лишены; и эта способность, какова бы ни была ее сущность, была бы связана с музыкой, была бы частью музыки, поскольку, если бы все люди были ею лишены, не было бы великой музыки. В этих условиях, несмотря на то, что можно назвать нашим логическим знанием музыки, можем ли мы правдиво утверждать, что обладаем таким же глубоким знанием музыки, как Бетховен?

То же самое и с чистой математикой. Мы знаем по опыту, что многие люди, обладая высокоразвитым логическим мышлением, все же не способны понять высшую математику. Если бы математика была лишь логикой, такая ситуация казалась бы необычной. Логика, из-за неспособности увидеть в математике ничего, кроме ряда правил и предписаний, не подкреплённых творческой способностью, была прозвана ее противниками «бездумным мышлением». Но, не желая принимать сторону в споре, к которому большинство людей проявляет лишь небольшой интерес, следует отметить один момент, который должен быть понятен беспристрастному наблюдателю. За единственным исключением Гильберта, который, хотя и противостоит взглядам Рассела, отстаивает мнения несколько схожего характера, ни один из логиков не внес вклада в конструктивную сторону математики. Это снова кажется несколько странным, если вспомнить, что одним из первых достижений этой школы мыслителей было то, что логика даст им крылья. Невольно возникает подозрение, что логикам не хватает некоторой творческой способности, о которой они, возможно, не подозревают, и что в результате они, вероятно, занимают в математике положение, аналогичное положению профессора контрапункта и гармонии в музыке. В этих условиях сомнительно, обладают ли они достаточным пониманием этой сложной науки, чтобы внести какой-либо ценный вклад.

Конечно, подобное обвинение не может быть отнесено к Гильберту, чьи великие работы в творческих областях математики доказали, что он обладает творческими способностями в дополнение к чисто формальным аналитическим способностям, которыми обязательно должны обладать все математики, независимо от их склонностей. Благодаря позиции Гильберта эта проблема в целом считается спорной.

[137] В данном случае, однако, уравнение Лапласа является двумерным, а не обычным трехмерным, которое определяет распределение ньютоновского потенциала в пустом пространстве вокруг гравитационной массы конечных размеров. Однако двумерное уравнение Лапласа также дает распределение потенциала вокруг материи в особых случаях. Так происходит, когда мы рассматриваем притягивающий цилиндр равномерной плотности, конечного сечения и бесконечной длины.

[138] В частном случае колеблющегося маятника мы можем ограничить свое внимание реальной (*т. е.* не мнимой) областью рассматриваемой эллиптической функции. Но само существование эллиптических функций зависит от введения мнимых величин.

[139] Это, конечно, всего лишь фигура речи. Не предполагается, что молекулы вступают в фактический контакт. Кроме того, было бы трудно точно определить, как следует определять контакт для молекул.

[140] Таким образом, Эйлер, обсуждая абсолютное пространство и время, пишет: «Сущность пространства и времени не важна; важно то, необходимы ли они для формулировки закона инерции. Если этот закон может быть полностью и ясно объяснен только с помощью понятий абсолютного пространства и абсолютного времени (), то необходимость этих понятий можно считать доказанной». Опять же, Риман, обсуждая возможную неевклидовость пространства, придерживается аналогичной позиции. Мы читаем: «Возможно, что отношения измерения пространства в бесконечно малых величинах не соответствуют предположениям нашей [евклидовой] геометрии, и, фактически, мы должны предположить, что они не соответствуют, если это позволит нам объяснить явления более простым способом».

[141] Бергсон, «Продолжительность и одновременность».

[142] Бертран Рассел, статья о неевклидовой геометрии в *Encyclopaedia Britannica* и различные другие работы. Однако следует отметить, что Рассел недавно изменил свои взгляды на эту тему.

[143] Уайтхед, «Принцип относительности».

[144] Обе попытки закончились неудачей.

[145] Квантовые явления теперь, по-видимому, объясняют то, что Ритц приписывал новой сущности, магнетону.

[146] Мы могли бы также упомянуть годовое изменение угла аберрации звезды и его связь с параллаксом звезды. Эта связь представляется совершенно загадочной.

[147] Курсив наш.

[148] Отношение Канта к абсолютному пространству Ньютона несколько неоднозначно. Иногда он защищает абсолютность пространства, широко используя аргументы Ньютона и Эйлера. В других случаях он приводит свои собственные аргументы в пользу относительности пространства и движения. Наконец, в своей последней работе (*«Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaften»*) он пишет: «Абсолютное пространство необходимо не как концепция реального объекта, а как простая идея, которая должна служить правилом для рассмотрения всего движения в нем как чисто относительного». Как движение может быть относительным, а пространство — абсолютным, — это проблема, которую Кант не смог прояснить. В любом случае, проблема абсолютности пространства и времени в классической науке относится *не к сущности пространства и времени* (проблема, которая дегенерировала бы в проблему метафизики и, следовательно, была бы бессмысленной для ученых), а исключительно к обсуждению тех концепций, которые требуются миром опыта. Следовательно, мы можем понять, что человек, не знакомый с механикой, не в состоянии высказать то или иное мнение. А знания Канта в области ньютоновской механики были, мягко говоря, крайне скудными.

Так, в его *«Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels»* мы находим неверные формулы для самых элементарных фактов, касающихся падающих тел. Кроме того, основывая свои аргументы на том, что он считает законами динамики, он рассказывает нам о туманности, которая начинает вращаться из-за того, что ее внешние части падают к центру и отскакивают в стороны от внутренних частей. Но эта гипотеза явно противоречит принципам динамики, и если бы Кант рассказал о человеке, подтягивающем себя за ботинки, он не выразил бы большей абсурдности. В то время как последнее утверждение нарушало бы принцип действия и противодействия, утверждение Канта нарушает неизменность количества импульса в самодостаточной динамической системе.

[149] Развитие и постепенное признание кинетической теории газов особенно поучительны в этом отношении. Около двух веков назад Даниэль Бернулли предположил, что склонность газа к расширению может быть объяснена стремительным движением его молекул. Но поскольку эта идея не была разработана количественно, ей не уделялось большого внимания. Только примерно через столетие она была исследована математически Максвеллом и Больцманом. По этой причине эти ученые считаются авторами кинетической теории, а имя Бернулли (в связи с этой теорией) утратило всякий интерес, кроме исторического. Теоретические предположения Максвелла и Больцмана были *количественно* подтверждены экспериментами, проведенными в их время, и большое число ученых признало эту теорию обоснованной. Тем не менее, у этой теории все еще были противники, поскольку последующие эксперименты доказали, что в вопросе удельной теплоемкости при низких температурах теория и наблюдения находились в полном противоречии. Дальнейшие трудности были связаны с проблемой равномерного распределения энергии. В результате другие физики (в частности, Кельвин и Оствальд) были настроены враждебно по отношению к кинетической теории.

На этом этапе необходимо упомянуть, что еще в 1827 году английский врач по имени Браун заметил, что мелкие частицы, взвешенные в жидкости, при наблюдении под микроскопом казались дрожащими. Браун объяснял эти странные движения присутствием живых организмов; другие предполагали, что они были вызваны неравномерностью температуры, вызванной освещением микроскопа. С другой стороны, сторонники кинетической теории утверждали, что эти броуновские движения были вызваны ударами молекул жидкости о взвешенные частицы. Теперь важно понять, что последняя гипотеза могла служить только предположением. Прежде чем на нее можно было бы положиться, необходимо было доказать, что точно наблюдаемые броуновские движения *полностью* соответствуют *количественным* требованиям кинетической теории, а количественная теория такого рода никогда не была сформулирована. Таково было положение дел, когда Эйнштейн в одной из своих первых работ дал исчерпывающее количественное решение проблемы броуновских движений (как в случае перемещений, так и вращений), указав, какими должны быть точные движения, *если* кинетическая теория жидкостей соответствует действительности.

Затем Перрен подверг броуновские движения точным количественным измерениям с целью проверки предсказаний Эйнштейна. Результат оказался разочаровывающим, поскольку Перрен обнаружил значительное расхождение между этими предсказаниями и экспериментом. Таким образом, кинетическая теория броуновских движений оказалась несостоятельной, а в более общем плане под угрозой оказалась вся кинетическая теория газов и жидкостей. Узнав о результатах Перрена, Эйнштейн пересмотрел свои вычисления и обнаружил в них числовую ошибку. Исправив эту ошибку, он обнаружил, что теоретические прогнозы полностью согласуются с измерениями Перрена. Примерно в то же время с помощью математических вычислений, основанных на квантовой теории, Эйнштейну удалось объяснить упомянутую ранее проблему удельной теплоемкости. Что касается аргументов, направленных против кинетической теории на основании «теоремы равномерного распределения энергии», то на них, в свою очередь, был дан ответ благодаря квантовой теории, которая сама по себе является результатом количественного исследования. В конечном итоге кинетическая теория была окончательно утверждена, принцип энтропии перестал считаться абсолютным, и Оствальд сдался.

Наша цель в представлении этого краткого исторического обзора проблемы броуновского движения заключалась в том, чтобы показать, что необоснованные догадки, если они не подкреплены точными количественными аргументами, представляют мало интереса для физической науки. По этой причине не придается большого значения расплывчатым атомистическим спекуляциям Демокрита или релятивистским спекуляциям Маха, даже если в свете последующих событий последние могут оказаться правильными. Во всех случаях такого рода заслуга (и вполне справедливо) принадлежит теоретическому исследователю, которому удалось преодолеть основную трудность, заключающуюся в разработке теории в соответствии с жесткими математическими принципами. Конечно, во многих случаях мыслитель, который делает предположение или выдвигает гипотезу, также развивает ее математически. Так было с Эйнштейном, когда он сформулировал постулат эквивалентности с целью интерпретации значения равенства двух масс. Когда имеет место двойной вклад такого рода, заслуга, конечно, двоякая.

[150] «Значение относительности».

[151] Совсем недавно доктор Уайтхед предпринял попытку заново решить ту же проблему.

[152] Очень ясное изложение критики Пуанкаре приводится в книге Каннингема «Принцип относительности» (1914), стр. 173 и далее.

[153] В защиту абсолютного пространства-времени, плоского *везде и всегда*, доктор Уайтхед утверждает, что переменная кривизна, навязываемая пространству-времени материей в теории Эйнштейна, «вводит путаницу во всю предшествующую теорию измерения» и, следовательно, делает знание невозможным.

Мы не считаем этот аргумент обоснованным, поскольку абсолютные величины теории относительности никогда не были пространственными или временными, даже в специальной теории с ее плоским пространством-временем. Абсолютным был только интервал пространства-времени. Что касается обвинения в том, что общая теория делает знание невозможным, то оно опровергается тем фактом, что астрономические предсказания Эйнштейна настолько точны, что для их обнаружения потребовались самые совершенные инструменты и самые компетентные астрономы. Это вряд ли можно было бы ожидать от теории, которая сделала знание невозможным.

Дальнейший аргумент доктора Уайтхеда касается неоднозначности измерения вращения, которая вытекает из теории гравитации Эйнштейна, модифицированной материей пространства-времени. Так, он пишет: «Теория Эйнштейна, объясняя гравитацию, сделала вращение полной загадкой». После этой критики доктор Уайтхед продолжает путать общую теорию гравитации с цилиндрической вселенной и механикой Маха, не замечая, что первая не обязательно влечет за собой вторую. Эйнштейн неоднократно настаивал на этом моменте; кроме того, это совершенно ясно из самих уравнений гравитации.

В любом случае, трудно увидеть какую-либо ценность в критике, основанной на вращении. Все, что мы имеем право требовать от любой теории, — это чтобы она согласовывалась с существованием инерциальной системы отсчета, по отношению к которой вращение развивает центробежные силы, поскольку эти силы были обнаружены в ходе экспериментов. Но мы не имеем права утверждать, что какой-либо эксперимент, проведенный на сегодняшний день, был достаточно точным, чтобы продемонстрировать абсолютную неподвижность инерциальной системы отсчета, или отрицать, что эта система может страдать от определенной степени неопределенности, когда в ее окрестностях движутся большие массы. Аргумент доктора Уайтхеда, который, по его утверждению, «основан исключительно на прямых результатах экспериментов», таким образом, представляется научно необоснованным.

Фактически, расчеты были выполнены Дж. А. Шутеном (см. просветительское обсуждение этого вопроса Эддингтоном в «Математической теории относительности», стр. 99-100), и результаты показали, что неопределенность вращения, вызванная относительным движением Солнца, не превышает 1".94 за столетие в теории Эйнштейна. И, безусловно, ни эксперимент Ньютона с вращающимся ведром с водой, ни даже более точные испытания с маятниками и гироскопами не смогли бы обнаружить столь незначительную величину. Таким образом, представляется, что общая теория, хотя и требует флуктуирующего пространственно-временного фона, все же находится в полной гармонии с теми динамическими фактами вращения, которые более двухсот лет назад привели Ньютона к идее абсолютного пространства.

[154] (IA) относится к граничным условиям цилиндрической вселенной.

[155] Вставлено для соответствия предыдущей терминологии.

[156] Тензорное выражение, построенное из g_{ik} и представляющее свойство сохранения, дается формулой
$$\left(G_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} G \right)$$
. Поэтому мы можем отождествить это выражение с наличием постоянной сущности, такой как материя. Вне этих постоянных сущностей структура пространства-времени будет задаваться выражением
$$\left(G_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} G = 0 \right)$$
, которое эквивалентно $G_{ik} = 0$. Если теперь мы интегрируем $G_{ik} = 0$ вокруг центральной точки, предполагая, что пространство-время является плоским в бесконечности, в наше решение необходимо ввести некоторую неопределенную константу интегрирования. Это чисто математическая необходимость, не имеющая ничего общего с физическим значением наших уравнений. Теперь, поскольку константа неопределена, мы можем присвоить ей любое значение по своему усмотрению. В зависимости от положительного или отрицательного значения, которое мы можем присвоить этой константе, мы должны

получить поле силы, притягивающее или отталкивающее вокруг нашей частицы; и закон распределения силы будет приблизительно соответствовать закону обратной квадратичной зависимости. Только если мы присвоим константе нулевое значение, поле силы будет отсутствовать. Однако такое решение вряд ли допустимо. Таким образом, мы показали, что теория пространства-времени, независимо от каких-либо эмпирических исследований природы, предполагает существование постоянных сущностей, окруженных силовыми полями. На практике мы отождествляем неопределенную константу с «массой» центральной частицы; и поскольку масса в мире нашего опыта всегда положительна, константа всегда является положительным числом, и результатом является притяжение. Таким образом, получается интегрированная форма закона гравитации Эйнштейна.

[157] Или же настолько глубоко модифицированной, что по сути представляет собой новую теорию.

[158] С точки зрения научного метода, наиболее поучительно сравнить теорию Эйнштейна с теорией, которая не удовлетворяет требованиям науки. Мы имеем в виду попытку доктора Уайтхеда интерпретировать явление гравитации с точки зрения плоского пространства-времени Минковского. В последней главе мы отмечали, что до радикальной генерализации Эйнштейна решение проблемы гравитации на основе плоского пространства-времени было разработано Пуанкаре, Нордстрёмом и другими. Доктор Уайтхед хочет вернуться к этому типу решения. Одно из его преимуществ, по его утверждению, заключается в том, что оно исключает идею о том, что материя влияет на структуру пространства-времени. Является ли это преимуществом или нет — вопрос чисто субъективный, но в науке очень опасно отвергать простое согласование фактов опыта в пользу каких-то *априорных* предпочтений, которые невозможно проверить. Доктор Уайтхед, вероятно, утверждал бы, что в его случае эта критика несостоятельна, поскольку он привел веские аргументы в поддержку своих утверждений. Но в чем заключаются эти аргументы? Первый состоит в его утверждении: «Единственно возможная структура — это структура плоскостей и прямых линий». Однако, поскольку ни один математик не согласился бы с этим утверждением, создается впечатление, что Уайтхед просто повторил свое *априорное* убеждение в неизбежной однородности структуры пространства-времени, не обосновав свои взгляды каким-либо образом. В другом месте он пишет: «Являются ли эти материальные тела действительно конечными данными восприятия, не поддающимися дальнейшему анализу? Если да, то я сразу сдаюсь». На самом деле вряд ли какой-либо ученый согласился бы с гипотетическим оппонентом Уайтхеда в том, что материальные объекты действительно являются конечными данными восприятия. Но какая возможная связь существует между этой проблемой и совершенно другой, касающейся возможного воздействия материи на структуру пространства-времени? Очевидно, Уайтхед неявно предполагает, что мы *априори* знаем о пространстве-времени достаточно, чтобы утверждать, что на него никогда не может повлиять то, что не является конечным данным восприятия. Следовательно, его второй аргумент, как и первый, сводится к простому повторению его *априорных* убеждений. Продолжим.

Убедившись, что материальные тела не являются тем, чем их считает его гипотетический оппонент, он считает свою точку зрения доказанной. Материальные тела отныне называются «определенной когерентностью объектов чувств, таких как цвета, звуки и прикосновения». И эти объекты чувств «сразу же провозглашают себя прилагательными событий». По мнению доктора Уайтхеда, это исключает возможность материи оказывать какое-либо влияние на пространство-время, поэтому общая теория Эйнштейна должна быть отвергнута.

Трудно представить, как такие нечеткие аргументы могут способствовать решению проблем природы. В любом случае, предположив, что пространство-время является плоским или, по крайней мере, однородным *везде и всегда*, доктор Уайтхед вынужден объяснять гравитационные эффекты, предсказанные Эйнштейном, с помощью сил, генерируемых материей. Он объясняет возникновение эффекта сдвига, связывая его «с сочетанием двух причин: одной из них является изменение кажущейся массы из-за гравитационного потенциала, а другой — изменение электрических сил сцепления молекулы из-за гравитационного поля». Мы будем исходить из его авторитета и предположим, что первая из двух упомянутых им причин может быть выведена из его гравитационных уравнений, и будем заниматься исключительно второй причиной. Теперь, если мы не черпаем информацию из учебников по физике, написанных более тридцати лет назад, мы никогда не будем подвергаться впечатлению, что спектральные линии имеют какое-либо отношение к строению молекулы. Молекулярные колебания могут вызывать уширение линий из-за эффекта Доплера и, как известно, приводят к появлению диффузных полос спектра, но современные эксперименты проследили, что видимые линейные спектры возникают внутри атома. Из этого следует, что эти молекулярные корректировки, которые пытается ввести доктор Уайтхед, по-видимому, не

оказывают никакого влияния на сдвиг, который он предлагает объяснить. Однако мы хотим критиковать заявления доктора Уайтхеда не с точки зрения научной точности, а исключительно с точки зрения метода.

По его собственному признанию, ничего нельзя предсказать о сдвиге, пока мы не узнаем больше о молекуле (мы предполагаем, что он имеет в виду атом). Таким образом, он говорит нам: «Соответственно, чтобы с уверенностью определить, каким должен быть сдвиг (если он есть) спектральных линий, необходимо иметь некоторые знания о структуре молекулы». Доктор Уайтхед написал свою книгу до того, как сдвиг был наблюдаем на спутнике Сириуса, и, вероятно, счел более безопасным включить в текст слова «если таковой имеется» в скобках.

Только что приведенная цитата иллюстрирует слабое место этого типа теории. Поскольку мы практически ничего не знаем о внутриатомных явлениях, ответственных за излучение, мы можем безнаказанно постулировать все, что угодно, и в результате заставить теорию предсказывать любое смещение, которое мы пожелаем, будь то исчезновение или значительное изменение. Но цель научной теории — дать нам возможность предсказывать еще неизвестные явления, а не просто объяснять то, что мы уже знаем. Именно по этой причине закон всемирного тяготения Ньютона был таким большим прорывом по сравнению с законами Кеплера о движении планет или кристаллическими сферами Птолемея. Ведь закон Ньютона позволил нам предсказывать, как будет двигаться блуждающая комета, в то время как законы Кеплера не могли нам ничего сказать.

Теория, подобная теории доктора Уайтхеда, позволяет нам предсказывать что угодно — и, следовательно, ничего. Экспериментальная проверка невозможна, поскольку любые результаты эксперимента можно сразу же объяснить, изменив наши гипотезы *ad hoc*. Кроме того, нельзя не почувствовать, что если бы Эйнштейн ранее не предсказал существование сдвига, доктор Уайтхед никогда бы не вывел его из своей теории. Аналогичные выводы можно сделать и в отношении двойного изгиба луча звездного света.

Одна из причин, по которой теория Эйнштейна пользуется таким уважением среди ученых, заключается именно в том, что, предсказывая определенные явления и никакие другие, она позволяет подвергнуть себя проверке. Как писал Эйнштейн в 1918 году, за несколько лет до того, как смещение было наконец наблюждено на спутнике Сириуса: «Если смещение спектральных линий в красную сторону под действием гравитационного потенциала не существует, то общая теория относительности будет несостоятельной». Ученые требуют теорий, допускающих такие категоричные утверждения. Теории Ньютона, Максвелла и Эйнштейна относятся к этому типу.

[159] Однако разница чрезвычайно мала, как мы можем судить, возвращаясь к выражению для инвариантного пространственно-временного расстояния $s^2 = x^2 - c^2 t^2$. Если x выражается в метрах, а t — в секундах, то s будет равно 300 000 000. Предположим, что два сигнала, измеренные с набережной, находятся на расстоянии десяти метров друг от друга, а два световых импульса разделены интервалом в одну секунду. Если эти два события рассматривать с поезда, движущегося со скоростью 10 метров в секунду, то есть примерно 22 мили в час, то наблюдатель в поезде сможет пройти мимо каждого из двух вспышек в момент их появления, в результате чего, по отношению к его поезду, два события произойдут в одном и том же месте. Время разрыва t' между двумя событиями по отношению к поезду будет тогда равно $s^2 = c^2 t^2 - x^2 = c^2 t'^2$

(поскольку $x' = 0$). Подставляя наши числовые значения, мы получаем $t' = 1 - \frac{100}{(300,000,000)^2}$, что очень близко к одной секунде, как и было бы в классической науке. Кроме того, мы видим, что именно из-за огромного значения c разница между двумя науками на практике так трудно обнаружить. Именно по этой причине фундаментальный континуум, хотя и является пространственно-временным, для всех практических целей сводится к отдельному пространству и времени наших предков, если не учитывать очень высокие скорости.

[160] С учетом ограничений, упомянутых в предыдущих параграфах.

[161] См. Приложение I.

[162] Мы не знаем, готов ли Эддингтон по-прежнему отстаивать эти взгляды.

[163] Чрезвычайно ясное изложение этого вопроса дано доктором Сильберштейном в его замечательных книгах по теории относительности.

[164] Хотя на диаграмме они не кажутся перпендикулярными друг другу, направления времени и пространства Ot' и Ox' являются перпендикулярными, если учитывать особенности геометрии пространства-времени, с которой мы имеем дело.

[165] «Пространство, время и гравитация», стр. 141.

[166] Это верно только в общем случае, поскольку для рассмотрения проблем, связанных с трением, упругостью и т. д., необходимы дополнительные эмпирические данные. Кроме того, при рассмотрении любой конкретной проблемы необходимо получить информацию о массах и силах, участвующих в процессе, а это, конечно, требует физических измерений.

[167] Геодезические линии также являются самыми длинными расстояниями; суть в том, что они представляют собой предельные расстояния. Таким образом, если мы возьмем две случайные точки на сфере, то большая окружность, проходящая через эти точки, является геодезической линией. Но мы можем проследить эту геодезическую линию от одной точки к другой двумя разными способами: либо по кратчайшему пути, либо по линии, проходящей через антиподы на другой стороне сферы. В последнем случае геодезическая линия является самым длинным путем.

[168] Если ограничиться трехмерным пространством, то при его сферичности звезды, расположенные на конечной расстоянии, все равно имели бы исчезающий параллакс, так что казались бы находящимися в бесконечности. По этой причине сферическое пространство, хотя и конечное, визуально представлялось бы нам бесконечным. Теоретически также изображения звезд должны были бы формироваться на антиподах. Однако в эллиптическом пространстве эти изображения совпадали бы с самой звездой.

И наоборот, пространство Лобачевского, хотя и бесконечно по протяженности, казалось бы конечным, поскольку звезды в бесконечности имели бы неисчезающий параллакс и, таким образом, казались бы расположенными на конечном расстоянии.